

Aplicação da estampagem incremental no fabrico de moldes: Estudo de viabilidade técnico-económica para industrialização

Pedro Filipe da Silva Rodrigues

Dissertação do MIEM

Orientadora no INEGI: Doutora Marta Ilda Laranjeira Lopes de Oliveira

Orientadora na FEUP: Professora Doutora Ana Rosanete Lourenço Reis

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica



Departamento de Engenharia Mecânica

Ramo de Projeto, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel

Setembro de 2013

Ao meu Pai.

RESUMO

Face à cada vez maior competitividade nos mercados, o desenvolvimento de um sistema/produto mecânico passa pela comparação de alternativas à produção dos principais componentes e ferramentas a integrar, avaliando o seu desempenho técnico e económico.

A injeção de espumas (*RIM*) é um método de fabrico de produtos moldados a partir de componentes líquidos, com velocidades de produção bastante competitivas face a outros processos de moldação existentes. O envolvimento de um número reduzido de operações para a obtenção do molde, favorece o seu custo, consumo energético e adaptabilidade para uma maior gama de componentes a obter.

Este tipo de moldes é tipicamente obtido por um de três processos comuns: fabrico por *metalcoating*, fabrico em fibra de vidro e fabrico através de maquinaria em bloco de alumínio. Cada vez mais frequentemente, as empresas que produzem componentes à base de espuma pelo processo *RIM* evitam o recurso a moldes protótipo, procurando avançar com moldes definitivos para a produção o mais rapidamente possível, abrindo caminho à introdução de processos de fabrico mais avançados para a obtenção dos moldes. O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade da introdução do processo de conformação plástica de estampagem incremental de chapas para a obtenção deste tipo de moldes.

O estudo envolveu o conhecimento pormenorizado da geometria de cada peça-tipo, o que originou uma análise da sua viabilidade técnica. Nos últimos anos, têm sido realizados estudos e desenvolvimentos no domínio dos processos de conformação incremental, assim, durante este trabalho, será realizado um esforço no sentido de avaliar o potencial de aplicações das estratégias *ISF* para a obtenção deste tipo de moldes *RIM*.

Neste sentido, de modo a demonstrar o processo *ISF* como um novo processo de fabrico de moldes, foi desenvolvido um estudo sobre um determinado número de moldes a ser reproduzidos para a empresa *Sunviauto*.

Application of incremental sheet forming in the manufacture of molds: Study of technical and economic feasibility for industrialization

ABSTRACT

Given the increasing competitiveness in the markets, the development of a system/product involves the comparison of alternatives to the production of key components and tools to integrate, evaluating their technical and economic performance.

The reaction injection molding of foam (*RIM*) is a method for manufacturing molded products from liquid components, with very competitive production rates compared to other casting processes exist. The involvement of a reduced number of operations for obtaining the mold, promotes its cost, energy consumption and greater adaptability for a range of components to be obtained.

This type of mold is typically obtained by one of three common methods: metalcoating, fiber glass based coating and machining of a block of aluminum. Frequently, companies producing foam-based components obtained by *RIM*, avoid the use of prototype molds, pushing forward to the final production mold as soon as possible, paving the way for the introduction of more advanced manufacturing processes to obtain the molds.

The objective of this study is to assess the feasibility of introducing the process of incremental sheet forming (*ISF*) to obtain this type of mold. The study involved the detailed knowledge of the geometry of each part-type, which led to an analysis of its technical feasibility. In recent years, studies have been conducted and developments in the field of incremental forming processes, thus, in this work, there will be an effort to evaluate the potential application of *ISF* strategies for obtaining this kind of *RIM* molds.

In this regard, in order to demonstrate the process as a new *ISF* mold manufacturing process, a study was conducted on a selected number of molds to be reproduced to *Sunviauto*.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e ao meu irmão, por todo o seu carinho, apoio, encorajamento e sacrifício imensuráveis em prol da minha formação tanto pessoal como académica.

À minha orientadora no *INEGI*, Dr.^a Marta Oliveira pela orientação nesta fase final do curso, assim como por toda a sua disponibilidade, e pela disponibilização de recursos, conhecimentos transmitidos e autonomia proporcionada ao longo de todo este trabalho de dissertação.

À minha orientadora na *FEUP*, Prof.^a Dr.^a Ana Rosanete Reis pela disponibilidade, interesse e orientação, patente nas reuniões realizadas no decurso deste trabalho.

Ao Prof. Rui Neto, fica o agradecimento pela transmissão de conhecimentos e pelas sugestões sobre estratégias a tomar durante a fase do trabalho sobre viabilidade económica.

Ao Eng. Gilberto Lobo da empresa *Sunviauto*, e ao seu fornecedor Eng. Pedro Oliveira da empresa *Esmomolde*, fica o agradecimento pela disponibilização de material e transmissão de conhecimentos sobre os diferentes processos de conceção de moldes para injeção de espumas (*RIM*).

Agradeço ao *INEGI* por ter posto à minha disposição todos os meios e recursos necessários à realização deste trabalho e a todos os elementos da equipa do *CETECOP* que, de forma mais ou menos direta auxiliaram na sua realização. Um agradecimento especial à colaboradora Andreia Durães, pela facilitação de dados importantes à realização deste trabalho e ao colaborador Eng. Rogério Araújo pela sua disponibilidade, transmissão e aplicação de conhecimentos sobre processo incremental de chapa fina (*ISF*).

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela disponibilização das suas instalações e recursos necessários à elaboração deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos, por toda a ajuda que me ofereceram, em especial uma palavra de enorme agradecimento a Carlos Dias pelo seu apoio na realização deste trabalho.

CONTEÚDO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
CONTEÚDO	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Metodologia.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 A empresa <i>Sunviauto</i>	3
2.2 Moldação de espuma por injeção.....	4
2.2.1 Descrição do processo	4
2.2.2 Processo de fabrico para obtenção de moldes RIM.....	5
2.2.3 Matérias-primas	9
2.2.4 Controlo do Processo.....	12
2.2.5 Sistemas de segurança associados ao molde <i>RIM</i>	14
2.2.6 Sistema de purga.....	16
2.2.7 Desmoldação	16
2.3 Estampagem incremental de chapas metálicas	17
2.3.1 Descrição do processo	17

2.3.2	Variáveis do processo a parametrizar	18
2.3.3	Vantagens e limitações do processo	30
2.3.4	Principais aplicações do processo.....	31
2.4	<i>Trade-off</i> técnico-económico e sistema de classificação	33
2.4.1	Interpretação de dados	34
2.4.2	Estimativa de Custos	36
3	DESENVOLVIMENTO	37
3.1	Estratégias de obtenção de moldes por ISF	37
3.2	Seleção do processo de fabrico do molde e viabilidade do <i>ISF</i>	39
3.3	Casos de estudo.....	40
3.4	Seleção dos casos de estudo a trabalhar.....	43
3.4.1	Assento	44
3.4.2	Apoio de cabeça.....	45
3.4.3	Encostos lombares	45
3.5	Análise da viabilidade técnica da implementação ISF	46
3.5.1	Seleção da matéria-prima	46
3.5.2	Quantidade de matéria-prima	47
3.5.3	Ferramentas / Acessórios e Estruturas.....	54
3.5.4	Pré e pós-processamento	56
3.6	Análise da viabilidade económica da implementação ISF	57
3.6.1	Estimativa de custos para os processos atuais de conceção de moldes <i>RIM</i> 58	
3.6.2	Análise da estimativa de custos para o novo processo de produção de moldes <i>RIM</i>	61
3.6.3	Comparação da estimativa de custos das alternativas de conceção de moldes <i>RIM</i> 64	
4	CONCLUSÕES	65
4.1	Conclusões	65
4.2	Trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE	71
	Anexo A.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fatores críticos do processo de moldação de injeção por reação [5, 6].	4
Figura 2.2 Diagrama de concepção de um molde por injeção e reação pelo método metalcoating.	5
Figura 2.3 Exemplo de molde por metalcoating.	6
Figura 2.4 Exemplo de contra saídas nas laterais interiores do molde.	7
Figura 2.5 Exemplo de molde de alumínio.	7
Figura 2.6 Exemplo de molde em fibra de vidro, com sistema de aquecimento.	8
Figura 2.7 Exemplo de molde em fibra de vidro, sem sistema de aquecimento.	8
Figura 2.8 Exemplo 1: Aplicação de espumas de poliuretano [5].	9
Figura 2.9 Exemplo 2: Aplicação de espumas de poliuretano [5].	9
Figura 2.10 Processo de fabricação de espumas flexíveis moldadas a quente [5].	10
Figura 2.11 Processo de fabricação de espumas flexíveis moldadas a frio [5].	10
Figura 2.12 Exemplo de instabilidade na espuma [5].	11
Figura 2.13 Diagrama de processamento de espumas semiflexíveis [5].	11
Figura 2.14 Exemplo de aplicação de espuma semirrígidas (para-choques) [5].	12
Figura 2.15 Exemplo da posição de serpentinas de aquecimento.	13
Figura 2.16 Sistema de abertura e fecho do molde.	14
Figura 2.17 Estrutura do molde.	15
Figura 2.18 Sistema de Jitos.	16
Figura 2.19 Processo de estampagem incremental em chapas [11].	17
Figura 2.20 Classificação do processo ISF [2].	18
Figura 2.21 Elementos Básicos do Processo ISF [9].	19

Figura 2.22 Estampagem Incremental de Único Ponto [9].....	19
Figura 2.23 Estampagem Incremental de único ponto (SPIF) [9].	20
Figura 2.24 Princípio do processo de combinação SF+ISF, (A) Instalação; (B) Processo SF; (C) Processo ISF [13].....	20
Figura 2.25 Classificação do caminho da ferramenta [2].	21
Figura 2.26 Trajetória da ferramenta [2].	21
Figura 2.27 Estampagem incremental em múltiplos estágios [17].....	22
Figura 2.28 Representação do passo incremental [18].	23
Figura 2.29 Duas variantes do caminho de trabalho [19].....	23
Figura 2.30 Estudo da altura de crista [19].....	24
Figura 2.31 Prisma quadrangular com ângulo de parede de 81° [15]	26
Figura 2.32 Geometrias adquiridas pelo processo ISF [9].	26
Figura 2.33 Método do suporte [32].	27
Figura 2.34 Ferramenta multi-cabeça (a), esquema representativo (b) [32].....	27
Figura 2.35 Conformação elétrica quente [33].	28
Figura 2.36 Processo de conformação por laser aplicado ao processo ISF [34].	28
Figura 2.37 Ferramenta de aço de cementação e material polimérico [9].....	29
Figura 2.38 Ferramenta esférica universal [9].	29
Figura 2.39 Conformação por jato de água [9].....	29
Figura 2.40 Exemplo 2 do processo na área automóvel [26, 28].	31
Figura 2.41 Exemplo 2 do processo na área automóvel [9].	31
Figura 2.42 Exemplo 3 do processo na área automóvel	32
Figura 2.43 Tubo de ventilação [24].....	32
Figura 2.44 Prótese de um tornozelo [39].	32
Figura 2.45 Classes de custos de um molde [44].....	36
Figura 3.1 Estratégia 1.	38
Figura 3.2 Peça-tipo 1.....	41
Figura 3.3 Peça-tipo 2.....	41
Figura 3.4 Peça-tipo 3.....	42
Figura 3.5 Peça-tipo 4.....	42
Figura 3.6 Peça-tipo 5.....	42
Figura 3.7 Peça-tipo 6.....	42
Figura 3.8 Exemplo do cálculo da profundidade.	43

Figura 3.9 Exemplo, zona demarcada para uso de uma ferramenta (matriz).	43
Figura 3.10 Exemplo, aplicação da matriz.	43
Figura 3.11 Peça-tipo 1, posição da ferramenta.	44
Figura 3.12 Peça-tipo 1, geometria posterior.....	44
Figura 3.13 Peça-tipo 2, reentrâncias.	44
Figura 3.14 Peça-tipo 2, ferramenta.	44
Figura 3.15 Peça-tipo 3, ferramenta.	45
Figura 3.16 Peça-tipo 3, degrau.	45
Figura 3.17 Peça-tipo 1, vista superior.	47
Figura 3.18 Peça-tipo 1, vista inferior.	47
Figura 3.19 Peça-tipo 1, vista frontal.....	47
Figura 3.20 Peça-tipo 1, vista posterior.	47
Figura 3.21 Peça-tipo 1, vista lateral.	47
Figura 3.22 Peça-tipo 3, vista superior.	49
Figura 3.23 Peça-tipo 3, vista inferior.	49
Figura 3.24 Peça-tipo 3, vista frontal.....	49
Figura 3.25 Peça-tipo 3, vista lateral.	49
Figura 3.26 Peça-tipo 3, cavidade moldante superior (base).....	50
Figura 3.27 Peça-tipo 3, cavidade moldante superior (topo).....	50
Figura 3.28 Peça-tipo 5, vista superior.	51
Figura 3.29 Peça-tipo 5, vista inferior.	51
Figura 3.30 Peça-tipo 5, vista frontal.....	51
Figura 3.31 Peça-tipo 5, vista posterior.	51
Figura 3.32 Peça-tipo 5, vista lateral.	51
Figura 3.33 Subdivisão da peça-tipo 5.	53
Figura 3.34 Exemplo, peça-tipo 3, ferramenta tipo 1.	54
Figura 3.35 Exemplo, peça-tipo 3, ferramenta tipo 2.	54
Figura 3.36 Exemplo, peça-tipo 3, negativo + ferramenta.	54
Figura 3.37 Exemplo, peça-tipo 3, negativo da cavidade inferior.	54
Figura 3.38 Exemplo, peça-tipo 3 negativo + estrutura de reforço da cavidade inferior (caixa).	55
Figura 3.39 Exemplo, peça-tipo 3, negativo + caixa + refrigeração.....	55
Figura 3.40 Exemplo, peça-tipo 5, insertos.	55

Figura 3.41 Exemplo, peça-tipo 5, pormenor do inserto.	56
Figura 3.42 Exemplo, peça-tipo 5, insertos não amovíveis.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Tipo de molde construído por cada fornecedor.	8
Tabela 2.2 Componentes de sistema no processo a quente e a frio [5].	11
Tabela 2.3 Restrições aplicadas a diferentes tipos de molde [6].	14
Tabela 2.4 Tempo necessário de abertura do molde [6].	14
Tabela 2.5 Tempo necessário para desmoldação [6].	16
Tabela 2.6 Diâmetros de ferramentas estudados [18].	22
Tabela 2.7 Materiais avaliados [9].	25
Tabela 2.8 Interpretação dos coeficientes de avaliação.	34
Tabela 2.9 Trade-off técnico-económico à análise comparativa dos diferentes processos de fabrico para obtenção de moldes de reação por injeção.	35
Tabela 3.1 Passos dos processos de obtenção de moldes do tipo casca.	39
Tabela 3.2 Especificações dos assentos.	41
Tabela 3.3 Especificações do encosto de cabeça.	42
Tabela 3.4 Especificações dos encostos lombares.	42
Tabela 3.5 Características das ligas de alumínio [46-48].	46
Tabela 3.6 Propriedades mecânicas das ligas de alumínio [49].	46
Tabela 3.7 Especificações, peça-tipo 1.	48
Tabela 3.8 Estudo da variação da espessura da chapa, para peça-tipo 1.	48
Tabela 3.9 Especificações, peça-tipo 3.	49
Tabela 3.10 Estudo da variação da espessura da chapa, para peça-tipo 3.	50
Tabela 3.11 Especificações, peça-tipo 5.	52
Tabela 3.12 Estudo da variação da espessura da chapa, para peça-tipo 5.	52

Tabela 3.13 Especificações, por parte, peça-tipo 5.	53
Tabela 3.14 Estudo da variação da espessura da chapa, por partes, peça-tipo 5.	53
Tabela 3.15 Estimativa de custos das operações de pós-processamento.	57
Tabela 3.16 Densidade e estimativa de custos das matérias-primas.	57
Tabela 3.17 Processos atuais de moldação RIM – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção de protótipos.	58
Tabela 3.18 Molde por metalcoating – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção do molde.	58
Tabela 3.19 Molde fibra de vidro – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção do molde.	58
Tabela 3.20 Molde de alumínio – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção do molde.	59
Tabela 3.21 Estimativa de custos adicionais à produção de moldes RIM.	59
Tabela 3.22 Estimativa de custos detalhados dos processos atuais de concepção de moldes RIM.	60
Tabela 3.23 Novo processo de moldação RIM – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção de modelos.	61
Tabela 3.24 Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo necessário ao fabrico de cada peça-tipo.	62
Tabela 3.25 Estimativa de custos adicionais à produção de moldes RIM por ISF.	62
Tabela 3.26 Estimativa da matéria-prima e tempo de concepção para realização da cavidade moldante superior.	62
Tabela 3.27 Estimativa de custos detalhados do novo conceito de moldes.	63
Tabela 3.28 Estimativa de custos e de massa final do molde da estratégia ISF e do tipo de protótipo.	64
Tabela 3.29 Estimativa de custos e massa final dos moldes associados aos processos atuais de moldação RIM em comparação com os moldes realizados pelo novo processo de moldação.	64
Tabela 3.30 Estimativa de tempo necessário à concepção de moldes RIM.	64

SIGLAS E ABREVIATURAS

MIEM	Mestrado integrado em engenharia mecânica;
FEUP	Faculdade de engenharia da universidade do Porto;
INEGI	Instituto de engenharia mecânica e gestão industrial;
CETECOP	Unidade das Tecnologias de Conformação Plástica;
RIM	Moldação de espumas por injeção e reação (<i>Reaction Injection Molding</i>);
ISF	Estampagem Incremental de chapa fina (<i>Incremental Sheet Forming</i>);
RP	Prototipagem rápida (<i>Rapid Prototyping</i>);
SPIF	Processo de Estampagem Incremental de Único Ponto (<i>Single Point Incremental Forming</i>);
TPIF	Processo de estampagem incremental de dois pontos (<i>Two Point Incremental Forming</i>);
SF	Processo que combina alongamento da chapa (<i>Stretch Forming</i>);
LS	Processo de conformação por laser (<i>Laser Forming</i>);
FLD	Curva limite de fratura (<i>Forming Limit Diagram</i>);
FLD ₀	Curva limite de fratura inicial;
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer-Aided Design</i>);
CAM	Fabrico assistido por computador (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>);
CNC	Comando numérico computadorizado (<i>Computer Numerical Control</i>);
°C	Grau Celsius, unidade de temperatura no sistema internacional;
s	Segundo, unidade de tempo no sistema internacional;
h	Hora, unidade de tempo no sistema internacional;
kg	Quilograma, unidade básica de massa no sistema internacional;

l	Litro, unidade básica de volume no sistema internacional;
€	Moeda oficial da União Europeia;
m	Metro, unidade de comprimento no sistema internacional;
mm	Milímetro, unidade de comprimento no sistema internacional;
°	Grau, unidade de medida de ângulos planos no sistema internacional;
XYZ	Orientação no Plano;
Δx ; Δy ; Δz	Valores dos passos incrementais segundo a horizontal (x e y) e a vertical (z);
mm/min	Milímetros por minuto;
MPa	Mega Pascal, a unidade padrão de pressão e tensão no sistema internacional;
Al	Liga de Alumínio;
t (mm)	Espessura da chapa após conformação;
t_0 (mm)	Espessura inicial da chapa;
φ (°)	Ângulo de inclinação após conformação;
σ (MPa)	Tensão limite elástico;
A (%)	Alongamento plástico axial;
CS	Coefficiente de segurança;
0,6 (mm)	Espessura mínima a atingir.
C (mm)	Comprimento da superfície;
L (mm)	Largura da superfície;
C_{FMP} (€)	Custo final da matéria-prima;
C_C (€)	Custo de concepção;
$C_{Prot.}$ (€)	Custo de protótipo;
$C_{MCon.}$ (€)	Custo molde por metalcoating;
$C_{MF.V.}$ (€)	Custo molde fibra de vidro;
$C_{MAl.}$ (€)	Custo molde alumínio;
C_{MISF} (€)	Custo molde ISF;
$C_{E.M.}$ (€)	Custo da estrutura de montagem;
C_{Outros} (€)	Outros custos.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Nos últimos anos, face ao volume de produção e às exigências de constantes alterações geométricas e funcionais dos produtos no mercado nacional e internacional, a recuperação das empresas passa pela capacidade de oferecer novos produtos no menor tempo possível, garantindo a minimização dos custos face à concorrência, através de uma redução do tempo de desenvolvimento, fabrico e comercialização. Para tal é cada vez mais importante encontrar processos que permitam obter novos protótipos, peças únicas ou pequenos lotes de peças de uma forma rápida e com baixo custo [1, 2].

Em principal destaque no desenvolvimento e produção de novos componentes encaixam os processos de moldação, os quais permitem a replicação de um número significativo de componentes atendendo às exigências do mercado. A viabilidade económica de processos de fabrico como o processo de moldação por injeção de espumas, depende cada vez mais da sua produtividade. Os moldes para injeção de espumas são ferramentas de precisão, relativamente elevada cuja manutenção preventiva é vital para o sucesso económico deste tipo de processos.

No âmbito do desenvolvimento e aplicação aos processos de injeção de espumas, surge o processo de estampagem incremental de chapa fina – *Incremental Sheet Forming* (ISF) – com vista à produção das meias cavidades que constituem os moldes de injeção.

A estampagem incremental de chapa fina emerge como um processo de conformação plástica que nos últimos anos tem sofrido um importante avanço tecnológico e experimental, visando a rápida construção de protótipos, de ferramentas ou produtos finais, adequados a cada aplicação [3, 4]. Este processo está sobretudo desenvolvido para a obtenção de produtos finais, sendo ainda necessário explorar a sua aplicabilidade para a produção de moldes de diferentes dimensões e características funcionais.

A aplicabilidade do *ISF* no fabrico das principais carcaças que integram os moldes de injeção de espumas instalados na *Sunviauto*, é o principal foco deste trabalho. Dada a diversa aplicabilidade, será sobretudo analisado o seu potencial para conseguir a

diminuição do tempo de concepção do molde, assim como o custo final de produção dos componentes injetados.

1.2 Objetivos e Metodologia

O objetivo deste plano de trabalhos é o estudo da viabilidade técnico-económica do processo de estampagem incremental para o fabrico de moldes. Este estudo inclui trabalho teórico sobre a implementação de estampagem incremental, com vista à definição das estratégias de processamento mais adequadas a diferentes tipos de molde/peça, a identificação dos recursos necessários à sua industrialização e o custeio dos mesmos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A empresa *Sunviauto*

A *Sunviauto*, dedica-se ao desenvolvimento e projeto de bancos para transportes coletivos. Tendo-se tornado um dos maiores fabricantes nacionais de bancos para o setor de transportes públicos e de serviço. Procura a praticabilidade de soluções eficientes e inovadoras como selo de excelência, mantendo-se uma empresa competitiva. Foi fundada no ano de 1969, a partir da fusão entre a *Sundlete, S.A.* com a *Auto-Aliados, Lda.*

Na década de 80, a família *Mota* torna-se a principal acionista, promovendo uma política de forte expansão nos mercados internacionais. Com isto, inicia-se um período de investimentos avultados associados à aquisição de novos equipamentos industriais, para os seguintes processos críticos:

- Tratamento de superfícies;
- Injeção de espumas de poliuretano;
- Confeção de capas para bancos na indústria automóvel.

Como fruto deste investimento, a empresa especializa-se na moldação de espumas por injeção e reação para integração devida nos seus produtos.

A unidade produtiva integra vários estágios, desde a aquisição da matéria-prima à distribuição do produto final ao consumidor passando pelo planeamento, processamento, produção e entrega do produto, e incluindo a obtenção/produção de moldes para injeção de espumas, processo integrado na produção de componentes *Sunviauto*.

O lançamento de novos produtos requer o uso de novos moldes e matrizes para os mais diferentes processos de fabrico, tais como forjamento, estampagem, moldação e moldação por injeção, sendo que o seu projeto e fabrico representa um aspeto muito importante em todo este processo.

2.2 Moldação de espuma por injeção

A tecnologia da moldação por injeção é um dos métodos de processamento mais importantes da conformação de materiais poliméricos, termoplásticos, borrachas ou poliuretanos/espumas sendo que esta dissertação terá maior ênfase sobre estes últimos. O processo é fácil de automatizar, caracterizando-se como um método de produção em massa, de baixo custo e com poucas operações de acabamento.

2.2.1 Descrição do processo

O processo de moldação de espumas por injeção e reação – *Reaction Injection Molding* (RIM) – é um método de fabrico que utiliza componentes líquidos, que quando misturados sofrem uma reação química. Esta reação controlada entre reagente e aditivo, resulta na conformação de um novo produto. Este processo integra um número reduzido de operações, o que o torna um processo de baixo consumo energético e custo relativamente baixo [5].

O modo de processamento de poliuretanos moldados é um processo descontínuo no qual são utilizadas máquinas que injetam as matérias-primas homogeneizadas por recirculação, que depois de misturadas são distribuídas em moldes abertos ou injetadas em moldes fechados. No momento após a injeção, os reagentes e os aditivos sofrem uma reação química, a qual origina a expansão do material por toda a cavidade, preenchendo-a e dando origem a um produto de qualidade [5].

Para que o processo seja realizado com sucesso, é necessária uma minuciosa estruturação da linha de moldação, a qual depende do tipo de processo e da área disponível nas instalações. De um ponto de vista geral, em grandes áreas de trabalho, pode ser utilizada uma linha de produção e alimentação contínua de moldes. Em áreas de trabalho mais reduzidas, deve adotar-se uma linha de moldação do tipo carrocel ou do tipo “U”. Nestes casos os moldes movem-se sob o equipamento de injeção, ou permanecem fixos enquanto o equipamento de injeção é movido de molde para molde [5].

Os fatores críticos que integram a produção de moldes de injeção por reação são estabelecidos na Figura 2.1.

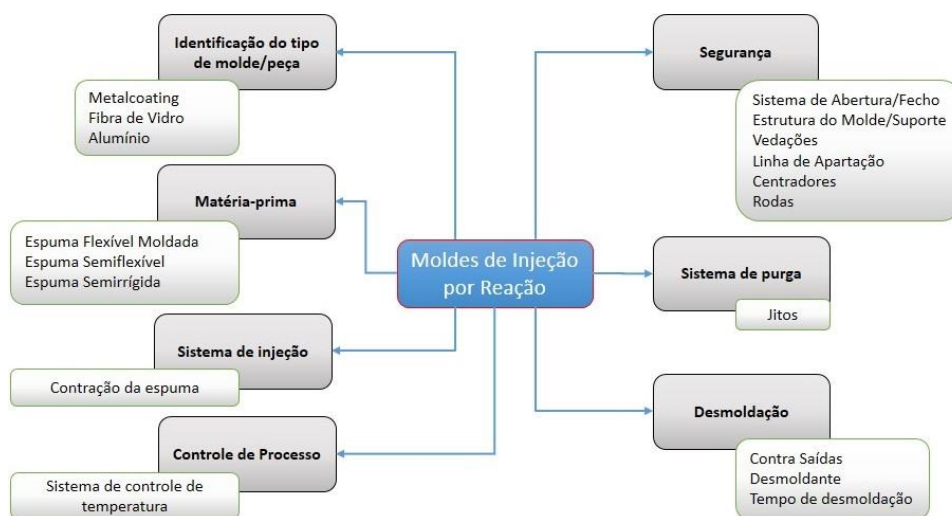


Figura 2.1 | Fatores críticos do processo de moldação de injeção por reação [5, 6].

Depois de todo um processo de moldação, o produto moldado é submetido a um processo de esmagamento num sistema de rolos de compressão, os quais têm como função quebrar as células que originam a expansão da espuma e assim dá-se por terminado todo o processo de obtenção de uma peça.

2.2.2 Processo de fabrico para obtenção de moldes RIM

A seleção do processo de fabrico para obtenção molde *RIM* está dependente de alguns requisitos considerados de elevada importância, e dependentes da aplicação final, necessidade de produção e custo final.

Atualmente, as tipologias mais comuns aparecem referidas como moldes por *metalcoating*, moldes em fibra de vidro e moldes maquinados em alumínio, exposto seguidamente.

METALCOATING

O molde por *metalcoating* assim conhecido pela referência do Inglês, tem por base uma carcaça conseguida através da deposição de pós metálicos.

O desenvolvimento de um molde por metalcoating segue a sequência de processos exemplificada no diagrama da Figura 2.2, partindo da construção de um modelo da peça a fabricar. A partir deste modelo é definido o plano de apartação, o qual deve ser plano. Após a seleção do modelo e plano de apartação, é concebida uma estrutura metálica (meio de segurança) na qual se define o modo de abertura e fecho do molde, assim como o sistema de dobradiças e cilindros pneumáticos que a facilitam.

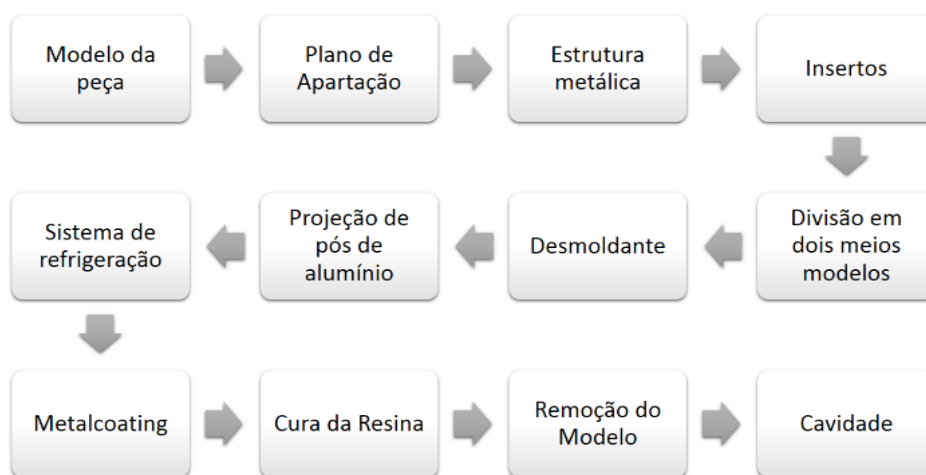


Figura 2.2 / Diagrama de conceção de um molde por injeção e reação pelo método metalcoating.

De modo a que o modelo possa ser retirado com sucesso, é aplicado um desmoldante ionizado a toda a sua superfície. Seguidamente executa-se uma divisão do modelo em meios modelos, os quais darão futuramente origem às meias cavidades constituintes do molde.

O trabalho que se sucede é realizado de modo individual em cada meio modelo. Com isto, escolhendo em primeiro o modelo que dará origem à cavidade superior, são implementados os insertos seguidos pela projeção de pós de alumínio sobre a superfície de cada meio modelo, os quais formam uma casca com espessuras a variar 0,5 a 1 mm. De seguida aplica-se o sistema de refrigeração/aquecimento, acoplando uma serpentina em cobre sobre a superfície disponível, tendo em especial atenção zonas críticas, que podem originar pequenas lacunas de material no produto final.

Com aplicação do processo de *metalcoating*, é preenchida toda a cavidade exterior do modelo. Isto origina uma estrutura de maior rigidez evitando também a corrosão nos elementos que constituem o molde. Após a cura da resina epóxi (cerca de 24 h, no mínimo), é removido o meio modelo mantendo toda a superfície produzida intacta.

Por fim, é realizado o mesmo processo sobre o meio modelo inferior. A única diferença entre os dois meios modelos é a não introdução de insertos no modelo inferior mantendo-se todo o restante processo. A Figura 2.3 apresenta um exemplo de molde por metalcoating concluído.



Figura 2.3 | Exemplo de molde por metalcoating.

ALUMÍNIO

Os moldes concebidos em bloco de alumínio são trabalhados por intermédio de processos de maquinagem, sendo o processo de fabrico comum na obtenção de moldes de injeção. Para tal, é desenvolvido um modelo CAD a partir do qual são criados códigos CNC destinados a diferentes processos de maquinagem, como a fresagem, furação e eletroerosão.

A acessibilidade de todo o processo de maquinagem é por vezes dificultada pela geometria da peça. Após a seleção do plano de apartação, é necessário ter em especial atenção as contra saídas geradas nas meias cavidades. Este pormenor por vezes origina a utilização de máquinas CNC bastante complexas, as quais consigam maquinar ângulos interiores (Figura 2.4), possibilitada pela inclinação da árvore principal ou da mesa de trabalho. Quando não existem estas possibilidades, o molde é produzido por partes. Numa primeira fase o bloco de alumínio é maquinado na sua totalidade, não existindo

geometrias de contra saídas no modelo; seguidamente são produzidos pequenos postigos com geometria proveniente de contra saída, os quais serão aparafusados ao bloco de alumínio final, originando assim o molde, Figura 2.5.

A maquinagem, divide-se em dois acabamentos, o acabamento grosseiro (a matriz sofre um grande desbaste de material) e o acabamento fino (as superfícies de trabalho sofrem um desbaste significativamente mais reduzido, originando deste modo um bom acabamento superficial) [7].



Figura 2.4 | Exemplo de contra saídas nas laterais interiores do molde.



Figura 2.5 | Exemplo de molde de alumínio.

FIBRA DE VIDRO

Os moldes em fibra de vidro são sobretudo utilizados para produzir réplicas de peças complexas e de grandes dimensões. O processo começa com a seleção do modelo a copiar. O modelo pode ser obtido em diversos tipos de materiais, como madeira, esferovite ou poliuretano.

A preparação do plano de apartação e dos modelos das meias partes é similar àquela descrita para os moldes por metalcoating.

A preparação dos moldes em fibra de vidro é iniciada pela aplicação de uma camada de *gelcoat* (resina que favorece a adesão da fibra de vidro a toda a superfície) seguida de uma camada de fibra de vidro, colocada de modo a produzir todos os contornos provenientes da peça. Esta última camada é ainda revestida por uma mistura de sílica coloidal e resina. De modo aumentar a robustez da cavidade em fibra de vidro, são aplicadas sucessivas camadas de fibra de vidro pelo mesmo método. Por fim todo o modelo é selado em vácuo e levado ao forno, a uma temperatura de 70 °C durante 30 – 240 minutos.

Após terminado o tempo de cura no forno, os modelos são retirados e deixadas as meias cavidades. Seguidamente é construída uma estrutura em volta do modelo, onde são aplicados os sistemas de abertura/fecho, dobradiças, cilindros pneumáticos e insertos, dando assim por finalizado o molde (Figura 2.6 e Figura 2.7).

Dada a maleabilidade do material usado na construção do molde, este processo possui um maior potencial para alterações futuras.



Figura 2.6 / Exemplo de molde em fibra de vidro, com sistema de aquecimento.



Figura 2.7 / Exemplo de molde em fibra de vidro, sem sistema de aquecimento.

A Tabela 2.1 faz referência às empresas que fornecem moldes à *Sunviauto*, assim como o tipo de molde produzido em cada empresa. A aquisição de um novo molde parte dos seguintes fatores: prazo no qual o molde é preciso, dimensão da peça, disponibilidade do fornecedor e preço do mercado. Com isto não é possível apontar um processo de fabrico ao fornecedor específico logo à partida, sendo necessário um pormenorizado estudo das peças a obter caso-a-caso.

Tabela 2.1 / Tipo de molde construído por cada fornecedor.

Fornecedores de moldes	Tipo de molde		
	Metalcoating	Fibra de Vidro	Alumínio
Esmomoldes	x	x	x
Auto		x	
Fibrauto		x	
Engnhotec			x
Maze			x
Moldazemeis			x

2.2.3 Matérias-primas

De entre os poliuretanos moldados mais relevantes destacam-se três variantes fáceis de manusear e que dão origem a componentes de geometrias variadas: espumas flexíveis moldadas, espumas semiflexíveis e espumas semirrígidas, sendo o primeiro tipo de espumas o utilizado pela empresa *Sunviauto*.

ESPUMAS FLEXÍVEIS MOLDADAS

As espumas flexíveis de poliuretano são produtos porosos, com células essencialmente abertas e características de elastómeros expandidos. A sua composição acarreta determinadas propriedades que favorecem a variação de formato, capacidade de amortecimento, memória de forma, absorção de acelerações horizontais e verticais, assim como a absorção de ruídos e vibrações [5, 6].

O setor da indústria automóvel abrange grande parte das suas aplicações, em peças como assentos, encostos, apoios de cabeça e revestimentos de interiores (Figura 2.8 e Figura 2.9). Na indústria de mobiliário, estas espumas são muito utilizadas no acolchoamento de móveis [5].

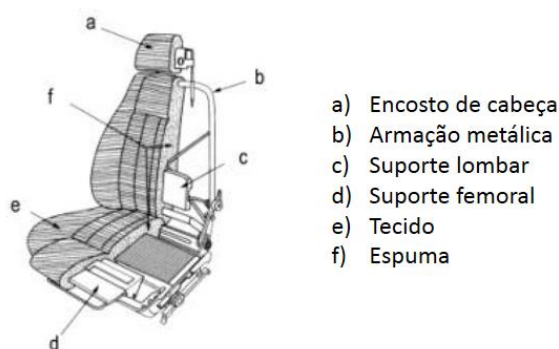


Figura 2.8 | Exemplo 1: Aplicação de espumas de poliuretano [5].

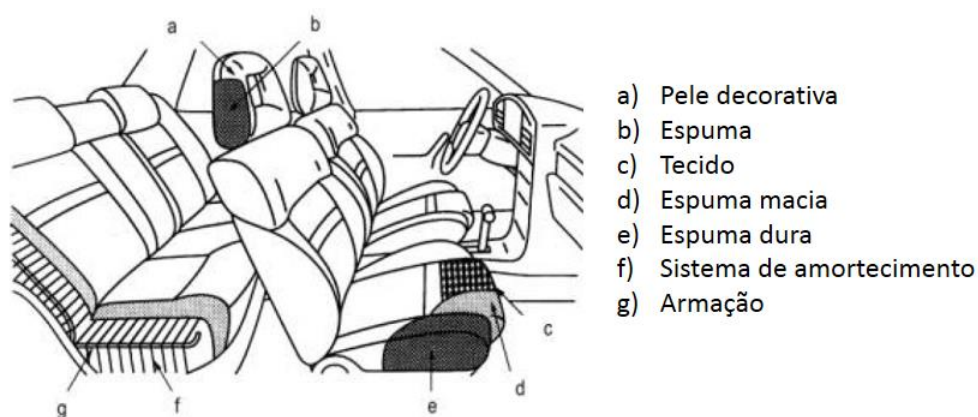


Figura 2.9 | Exemplo 2: Aplicação de espumas de poliuretano [5].

No processo de moldação de espumas flexíveis, distingue-se o processo a quente ou a frio. A versão a quente (Figura 2.10), requer um forno na linha de produção mantido a $150 - 250^{\circ}\text{C}$, a atingir $120 - 140^{\circ}\text{C}$ no interior do molde. O gradiente de temperaturas gerado ativa uma reação química nos componentes originando uma cura de expansão progressiva por todo o molde. Este ciclo de injeção dura cerca $20 - 30$ minutos [5].

A seleção do material base dos moldes para este processo é sobretudo função da espessura da parede. Os moldes utilizados podem ser construídos em aço carbono (espessuras de parede 1,5 a 2 mm), chapa de alumínio (espessura de parede de 4 a 6 mm) ou alumínio fundido (espessura de parede 6 a 10 mm) e devem ser bons condutores do calor suportando variações de temperaturas entre os 15 – 250°C [5].

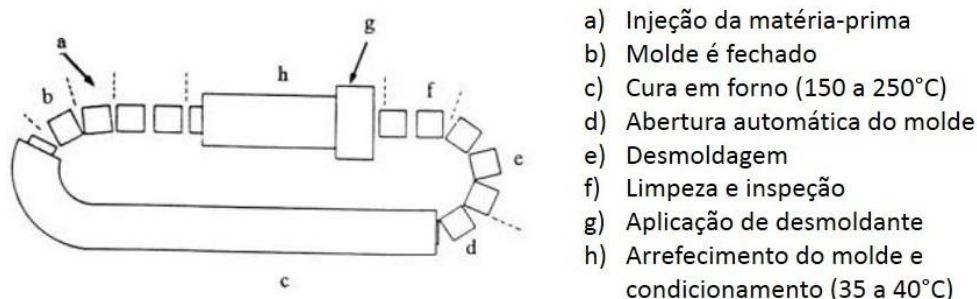


Figura 2.10 | Processo de fabricação de espumas flexíveis moldadas a quente [5].

No processo de moldação a frio (Figura 2.11), os equipamentos mais simples empregam moldes abertos manualmente para peças simples de pequeno porte, moldes abertos mecanicamente para peças mais complexas de grande porte. Todo o processo de fabrico é diferente do processo de moldação a quente. Neste caso as temperaturas de fabrico rondam os 40 a 60°C, permitindo um tempo de secagem do filme mais rápido. Para um controlo mais eficaz da temperatura, o molde é fornecido com canais de aquecimento, nos quais é permitida a passagem de um fluxo líquido, este fluxo gera um nível de temperatura constante que mantém o molde dentro da gama de temperaturas pretendida. Este sistema pode integrar moldes por *metalcoating*, moldes de alumínio ou moldes de fibra de vidro, e tipicamente são necessários alguns pré-enchimentos para estabilizar a temperatura do molde. A duração de todo o processo, desde o momento de injeção ao momento de remoção da peça final varia no intervalo 2 – 6 minutos.

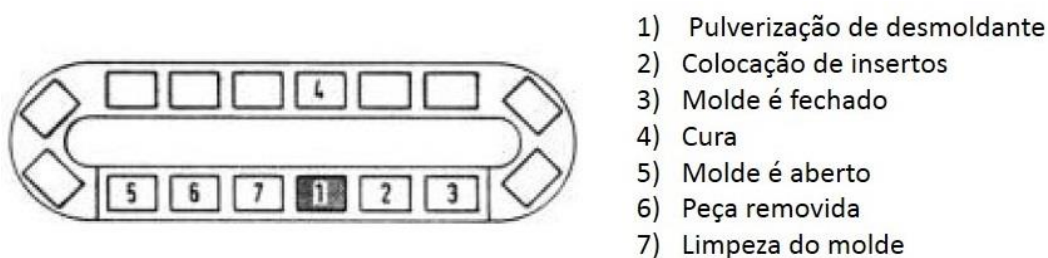


Figura 2.11 | Processo de fabricação de espumas flexíveis moldadas a frio [5].

A estabilidade da espuma é um dos principais fatores a ter em conta neste tipo de processos, havendo necessidade de verificações periódicas no sistema de injeção, principalmente no bico misturador, de forma a garantir uma injeção homogênea da mistura. Atendendo à expansão da espuma no interior do molde, este deve ser construído de modo a suportar pressões de 1 – 2 bar, e conter pequenas chaminés (insertos) que permitam a purga do ar que se encontra no seu interior e do excesso de espuma [5].

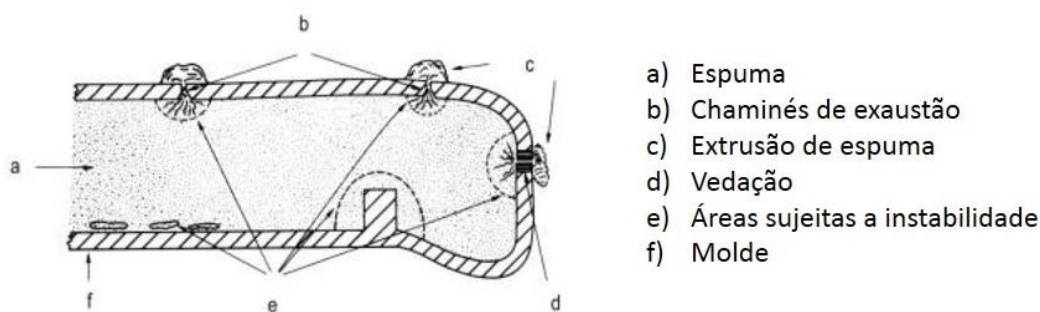


Figura 2.12 | Exemplo de instabilidade na espuma [5].

Estas diferenças entre os dois processos de moldação de espumas flexíveis refletem-se nas características das espumas. As espumas convencionais moldadas a quente possuem maior rigidez, com um fator de conforto de $1,7 - 2,0$, no entanto as espumas moldadas a frio são caracterizadas como espumas de alta resiliência, com um fator de conforto de $2,0 - 3,0$. Todo este sistema varia de acordo com a composição química das matérias-primas injetadas [5, 6]. A Tabela 2.2 demonstra diferenças básicas entre os dois processos.

Tabela 2.2 | Componentes de sistema no processo a quente e a frio [5].

Processo		A Quente	A Frio
Isocianato		TDI 80/20	TDI 80/20, TDI 80/20 com MDI e MDI
Poliol	Poliéster reativo	PM de 2800 – 3500	PM de 4500 – 6500
	Polimérico	Opcional	Opcional
Temperatura de forno (°C)		180 – 300	75 – 200
Pós-Cura		Não	Opcional
Temperatura do molde (°C)		25 – 45	50 – 70

ESPUMAS SEMIFLEXÍVEIS

As espumas semiflexíveis são produtos de baixo peso e excelente absorção ao impacto, aplicados nas partes internas de automóveis, como o painel de instrumentos, encosto de cabeça, portas, entre outros. A injeção deste tipo de espumas requer moldes que integrem um sistema de vácuo, onde é aplicada uma película de revestimento (tecido, pele ou filme termoplástico) antes da injeção da espuma, Figura 2.13 [5].

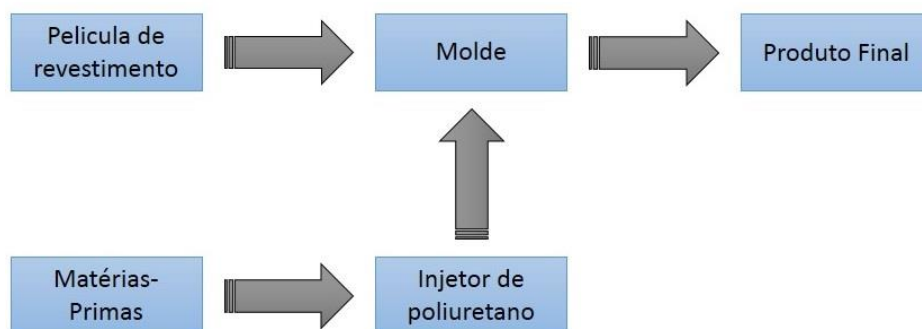


Figura 2.13 | Diagrama de processamento de espumas semiflexíveis [5].

ESPUMAS SEMIRRÍGIDAS

Espumas semirrígidas são produtos com grande capacidade de absorção de energia. Quando a espuma é submetida a esforços de impacto, a energia gerada pode ser absorvida através de dois mecanismos distintos: por expulsão e reentrada do ar retido nas estruturas celulares durante a deflexão, amortecimento pneumático ou por deflexão da estrutura celular, amortecimento mecânico [5].

Quando comparadas com as espumas flexíveis, a espuma semirrígida é sujeita a esforços de compressão. Devido à sua elevada rigidez estrutural, recupera mais lentamente a sua forma original, o que favorece a sua utilização em componentes associados à segurança do veículo automóvel, como os para-choques (Figura 2.14), proteção de joelho, proteção de impacto lateral e protetor de cabeça [5].

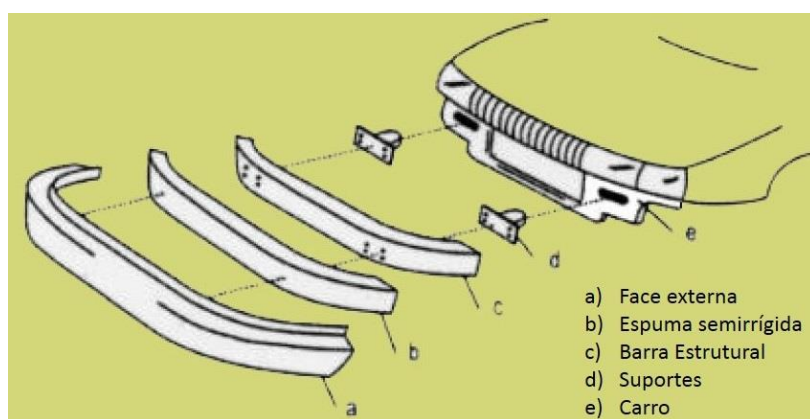


Figura 2.14 | Exemplo de aplicação de espuma semirrígidas (para-choques) [5].

2.2.4 Controlo do Processo

A temperatura é um dos fatores mais importantes no controlo do processo. Como mencionado no ponto 2.2.3, no caso de moldes de injeção a frio são necessárias temperaturas no interior do molde entre os 40 – 60 °C. Estas temperaturas estão dependentes do número de moldes ligados à rede de injeção de líquido de aquecimento, ocorrendo algumas perdas de temperatura sempre que é adicionado um molde ao sistema. Contudo a temperatura média de parede atingida pelos moldes é de 35 °C, temperatura com a qual se torna possível a injeção de poliuretano, sendo que a temperatura de injeção de poliuretano se situa nos 25 °C.

Para se proceder à obtenção de uma peça é necessário efetuar um aquecimento prévio do molde, de forma a realizar peças sem defeitos. No entanto existe um tempo de aquecimento pré-definido para cada tipo de molde; por exemplo, para aquisição de uma peça num molde de alumínio é apenas necessário um tempo de espera de 10 – 20 minutos para que o molde esteja operacional a trabalhar. Já nos moldes por *metalcoating* são necessários cerca de 30 – 40 minutos para que seja possível obter um produto. No caso dos moldes de fibra com aquecimento, os quais têm um rápido aquecimento de toda a sua superfície, após o aquecimento do molde, o sistema de aquecimento é desligado e é iniciado o processo de injeção. A grande vantagem que estes moldes trazem relativamente aos anteriores reside no facto de só ser necessário um aquecimento inicial, pois durante a

injeção este vai mantendo uma temperatura constante por toda a cavidade. O mesmo não acontece nos moldes em fibra sem aquecimento. Neste caso, são realizadas algumas injeções iniciais de modo a que o molde obtenha uma temperatura constante por toda a cavidade.

O meio com o qual são geradas estas temperaturas nos moldes dá-se através de serpentinas situadas nas cavidades, a diferença de temperatura entre moldes e o tempo de aquecimento variam com a posição do sistema de serpentinas no molde, podendo estas estarem sobre a superfície exterior oposta à cavidade (Figura 2.15) ou no interior do molde.



Figura 2.15 | Exemplo da posição de serpentinas de aquecimento.

A implementação de serpentinas nos moldes segue as seguintes regras:

- Só no caso de impossibilidade técnica é que não se coloca a serpentina de aquecimento;
- Tanto na tampa como na base do molde deve ser colocada uma serpentina em cobre;
- É obrigatório existir um desenho da serpentina bem cotado, ou uma foto à escala; ou ainda uma gravação na tampa/base do molde;
- Em moldes demasiados pequenos a serpentina pode entrar e sair do molde em linha reta.

2.2.5 Sistemas de segurança associados ao molde *RIM*

Os principais sistemas de segurança implementados neste tipo de moldes estão relacionados com:

- Mecanismo de abertura/fecho;
- Mecanismo do molde/suporte;
- Rodas.

MECANISMO DE ABERTURA E FECHO

O mecanismo de abertura inserido na tipologia de moldes de injeção de espumas é definido por diversas regras, as quais visam sobretudo sobre a segurança do operário, a sua facilidade de manuseamento e a quantidade de peças a produzir. A Tabela 2.3 dita as seguintes restrições [6].

Tabela 2.3 / Restrições aplicadas a diferentes tipos de molde [6].

Tipo de molde	Massa (kg)	Mecanismo
Molde para pequeno número de injeções	< 30	Mola
	> 30	Pneumático ou amortecimento a gás
Molde para elevado número de injeções	< 15	Mola
	> 15	Pneumático ou amortecimento a gás

No caso de um mecanismo do tipo pneumático, o fornecedor terá de o aplicar de forma a não desequilibrar a tampa do molde e de assegurar um sistema de segurança que permita que o fecho/bloqueio, em caso de qualquer anomalia no sistema de abastecimento de ar comprimido. Terá de ser realizada uma distribuição do esforço de ambos os lados da tampa colocando dois cilindros pneumáticos (igual para os amortecedores a gás) e deverá ser dimensionado em função da pressão existente na rede da empresa (Figura 2.16), de modo a respeitar os tempos de abertura indicados na Tabela 2.4 [6].



Figura 2.16 / Sistema de abertura e fecho do molde.

Tabela 2.4 / Tempo necessário de abertura do molde [6].

Encosto/Almofada	Tempo (s)
1 Lugar	4
2 Lugares	7
3 Lugares	10

ESTRUTURA DO MOLDE/SUPORTE

A estrutura do molde deverá ser sempre o mais leve possível. Para isso, deve usar-se perfis de aço fechados com bom equilíbrio entre peso e resistência, fornecendo a rigidez necessária de modo a não apresentar problemas durante o tempo de vida do molde (Figura 2.17). O equilíbrio tem de ser garantido pois é fundamental para uma boa vedação e durabilidade do molde.

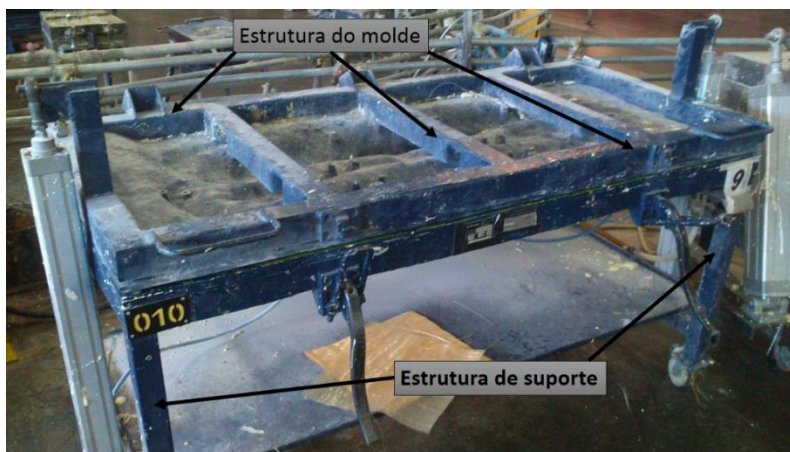


Figura 2.17 | Estrutura do molde.

A altura da estrutura de suporte é definida em função da altura da base e da distância do solo ao bico de injeção. O molde deverá ter uma inclinação de 4 %, sendo que a parte mais alta é a frente. Após a tampa aberta o ponto mais alto da base do molde tem de ter 800 mm. Apenas em casos específicos, como moldes muito estreitos e de difícil injeção, esta distância poderá ser redefinida [6].

RODAS

As rodas tem de ser capazes de suportar o peso do molde não apresentando qualquer problema durante o tempo de vida do produto. Facilitando o deslizamento do molde que terá de ser suave e sem oferecer grande resistência [6].

2.2.6 Sistema de purga

JITOS

Os sistemas de jitos aplicados a este tipo de moldes fornece capacidades de purga do ar do interior do molde, à medida que se dá a expansão da espuma (Figura 2.18).

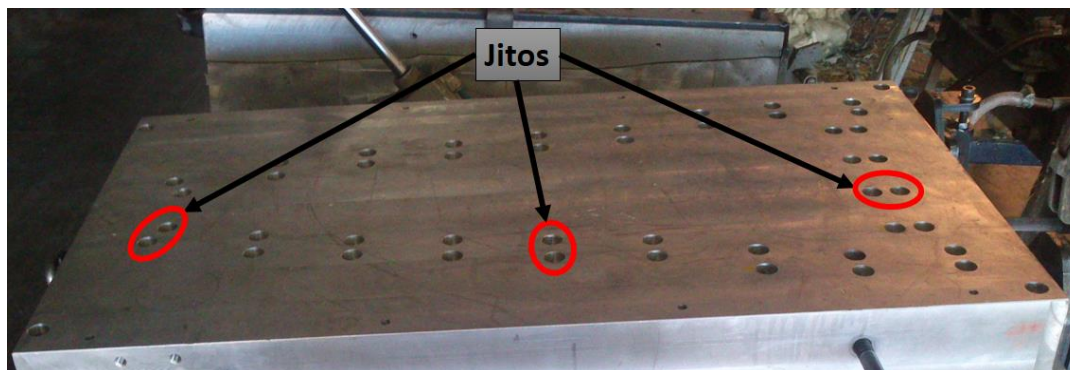


Figura 2.18 | Sistema de Jitos.

2.2.7 Desmoldação

Na modelação de um novo produto, deve ser realizado um estudo sobre o respetivo plano de apartação que permita a obtenção de um molde com o menor número possível de contra saídas, e que as contra saídas utilizadas não possuam geometrias de elevada complexidade que aquando da extração das peças provoque o rasgar das mesmas.

As contra saídas são geometrias existentes nos moldes que restringem a saída da peça moldada. Como as espumas de poliuretano são bastante maleáveis é possível proceder à sua extração sem haver necessidade de utilização de meios mecânicos. A Figura 2.5 indica o tempo de desmoldação necessário para sua extração [6].

Tabela 2.5 | Tempo necessário para desmoldação [6].

Encosto/Almofada	Tempo (s)
1 Lugar	5
2 Lugares	10
3 Lugares	15

LINHA DE APARTAÇÃO

A linha de apartação no caso dos moldes por *metalcoating* e moldes em fibra de vidro deve ser realizada o mais plana possível, permitindo deste modo uma boa vedação e fornecendo uma espessura máxima de rebarba de 0,25 mm com comprimentos que podem variar entre os 0 e os 50 mm [6].

2.3 Estampagem incremental de chapas metálicas

A estampagem incremental de chapa fina, patenteada por Leszak [8], baseia-se na conformação da mesma através de apenas um ponto de contato entre a chapa e a ferramenta. A estampagem convencional obriga à criação de uma nova matriz para cada novo produto, o que implica custos muito elevados em novas ferramentas. À medida que o mercado evolui para novos e mais rápidos processos, e lotes de modelação mais pequenos, processos inicialmente utilizados para prototipagem rápida – *Rapid Prototyping (RP)* – foram-se destacando cada vez mais [9, 10].

O desenvolvimento de processos de prototipagem rápida que utilizam uma abordagem de conformação plástica incremental sofreu um grande desenvolvimento na última década. Com esta abordagem, a deformação do material é conseguida de forma gradual, através da aplicação de menores cargas e taxas de deformação face aos processos convencionais. A maior formabilidade conseguida resulta na vantagem de se poder trabalhar com chapas de espessuras mais finas, reduzindo o consumo de material para uma mesma aplicação.

2.3.1 Descrição do processo

No ano de 1994, *Matsubara* introduziu o conceito de estampagem incremental (*ISF*) como método de prototipagem e fabrico de pequenas séries de produtos em chapa metálica, no ramo automóvel no Japão [11].

O desenvolvimento do processo ISF foi facilitado pela introdução de centros de comando computadorizados – *Computer Numerical Control (CNC)* – e do desenho auxiliado por computador – *Computer-Aided Design (CAD)*. O centro *CNC* permite a materialização de uma imagem tridimensional através de uma fresadora e de uma mesa onde se encontra fixo o suporte da chapa. O movimento relativo entre a ferramenta e a chapa dá-se sobretudo de fora para dentro, seguindo uma trajetória pré-definida e provocando, de forma incremental, deformações plásticas localizadas, obtendo como resultado a geometria pretendida. A fixação da chapa é feita por meio de um suporte cerra-chapas e o contacto da chapa com a ferramenta, ocorre numa pequena região que se move conforme a trajetória imposta, como se pode ver na Figura 2.19, [11].

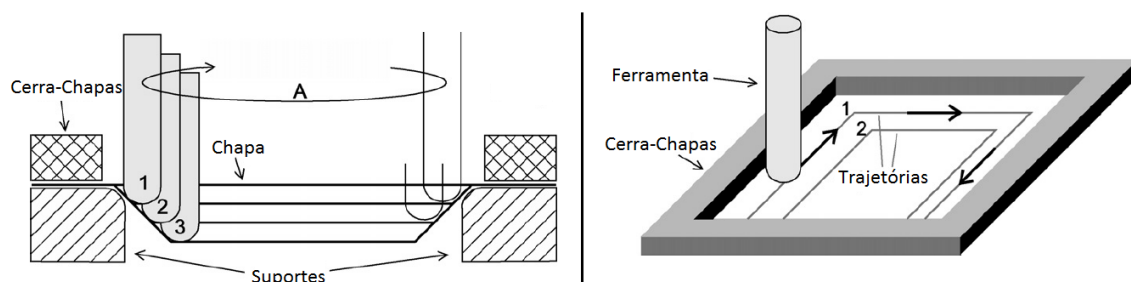


Figura 2.19 | Processo de estampagem incremental em chapas [11].

Através da deformação formada gradualmente consegue-se uma maior formabilidade da chapa em relação aos processos de estampagem convencionais, não havendo necessidade de um molde configurado, de acordo com a geometria da peça final [12].

Em suma este é um processo no qual:

- Existe conformação incremental de chapas metálicas;
- A ferramenta é sólida e de pequeno tamanho;
- Não contém grandes matrizes;
- A ferramenta estabelece um contacto contínuo com a chapa metálica;
- A ferramenta é movimentada de modo controlado num espaço tridimensional.

2.3.2 Variáveis do processo a parametrizar

As diferentes dimensões analíticas ao processo de conformação incremental são categorizadas no esquema representado na Figura 2.20.

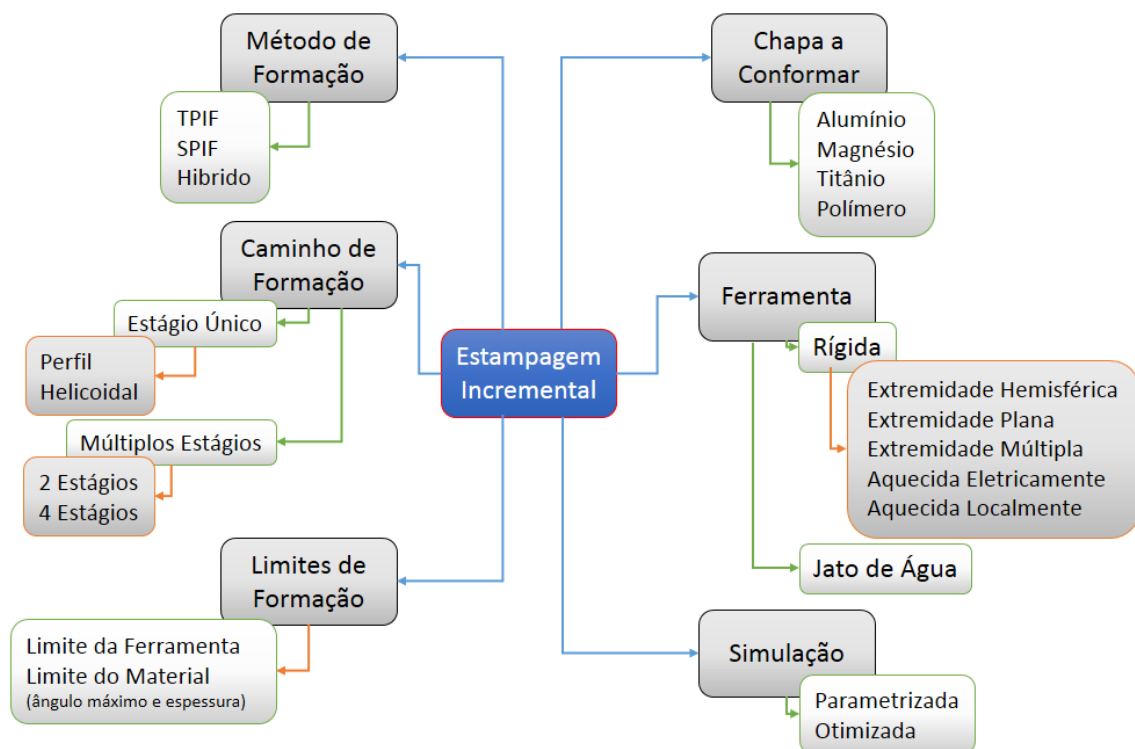


Figura 2.20 | Classificação do processo ISF [2].

2.3.2.1 Método de Conformação

O processo de conformação associado à estampagem incremental pode ser realizado com duas configurações distintas, estabelecido por dois tipos gerais de conformação, a conformação negativa e a conformação positiva, que traduzem os dois métodos de execução do ISF: o processo de estampagem incremental de único ponto – *Single Point Incremental* (SPIF) – e o processo de estampagem incremental de dois pontos – *Two Point Incremental Forming* (TPIF) – respetivamente [9].

Ambos os processos envolvem os seguintes recursos (Figura 2.21):

- Chapa metálica;
- Suporte;
- Cerra-chapas;
- Ferramenta;
- Controlo por *CNC*.

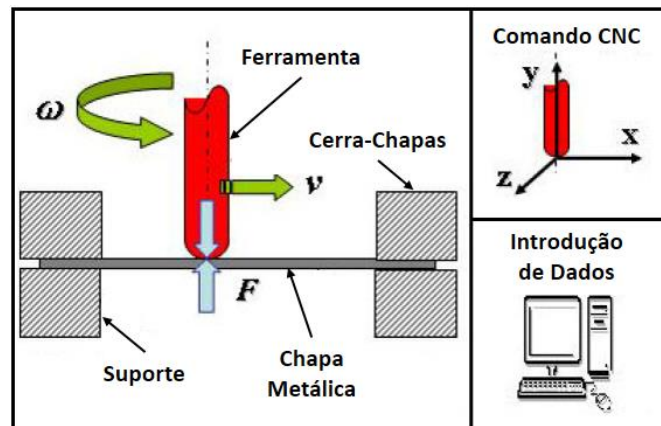


Figura 2.21 | Elementos Básicos do Processo ISF [9].

A. Estampagem Incremental de Único Ponto

Na estampagem incremental de único ponto (Figura 2.22), não é utilizada qualquer matriz. À medida que a chapa inicialmente plana é estampada obtém-se uma cavidade por deslocamento da ferramenta sobre a chapa metálica (no caso de se utilizar um centro de maquinagem), sendo que a zona do perímetro da chapa se mantém fixa por ação do cerra-chapas [9].

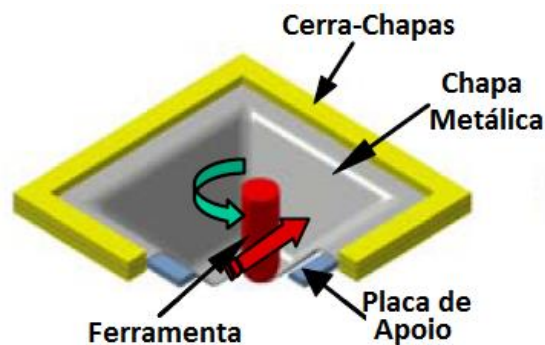


Figura 2.22 | Estampagem Incremental de Único Ponto [9].

B. Estampagem Incremental de Dois Pontos

A configuração positiva é conhecida como estampagem incremental de dois pontos. O suporte cerra-chapas tem um movimento segundo a vertical, alongando a chapa ao longo da matriz parcial/completa (Figura 2.23 – a; b), este alongamento é seguidamente trabalhado através da ferramenta, a qual vinca na chapa a forma final de acordo com o desejado [9].

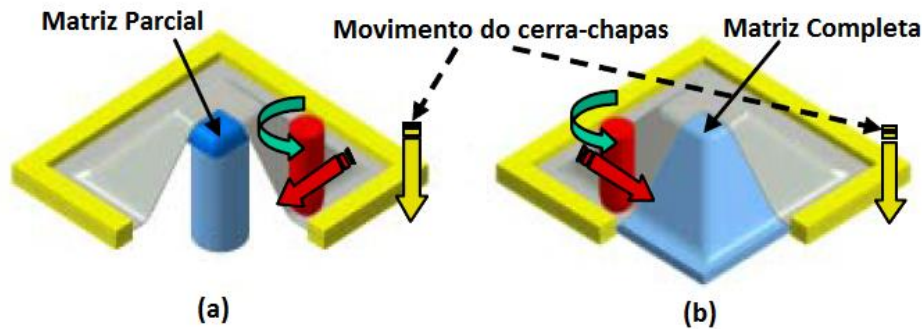


Figura 2.23 | Estampagem Incremental de único ponto (SPIF) [9].

C. Estampagem Incremental Híbrida

O método de estampagem incremental híbrida foi pensado de modo a superar algumas limitações apresentadas pelas variantes *TPIF* e *SPIF* anteriormente apresentadas. Assim, como o próprio termo híbrido indica, este processo combina o alongamento da chapa – *Stretch Forming* (*SF*) – com o *ISF* (Figura 2.24), e o processo de conformação a laser – *Laser Forming* (*LF*) [13, 14].

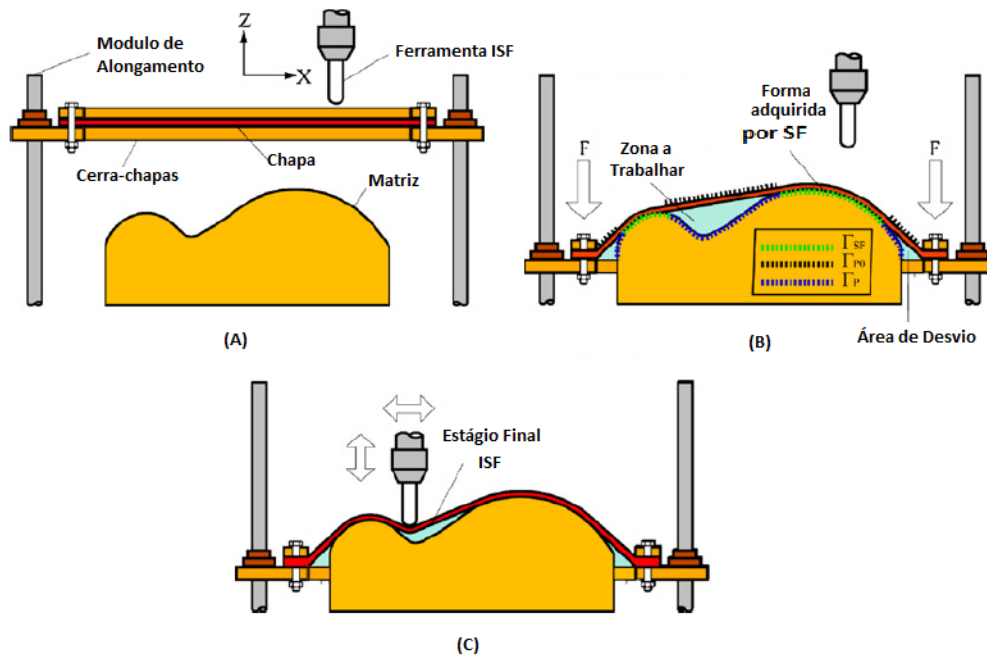


Figura 2.24 | Princípio do processo de combinação SF+ISF, (A) Instalação; (B) Processo SF; (C) Processo ISF [13].

2.3.2.2 Trajetória de Conformação

A. Estágio Único

O percurso de conformação percorrido pela ferramenta sobre a chapa pode ser desenhado como incremental ou helicoidal (Figura 2.25). Em ambos os casos deve ser obtida uma conformação suave [2].

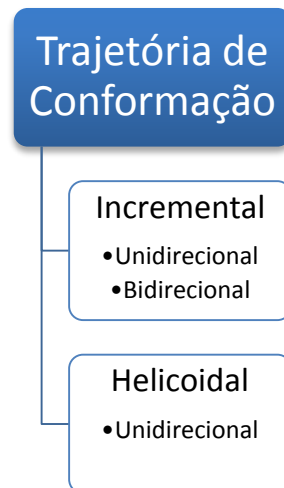


Figura 2.25 / Classificação do caminho da ferramenta [2].

A trajetória helicoidal (Figura 2.26 – a) apenas pode ser realizada no sentido direto ou indireto da rotação. Já no segundo caso a trajetória incremental pode ser realizada unidireccionalmente (Figura 2.26 – b) ou bidireccionalmente (Figura 2.26 – c) [2].

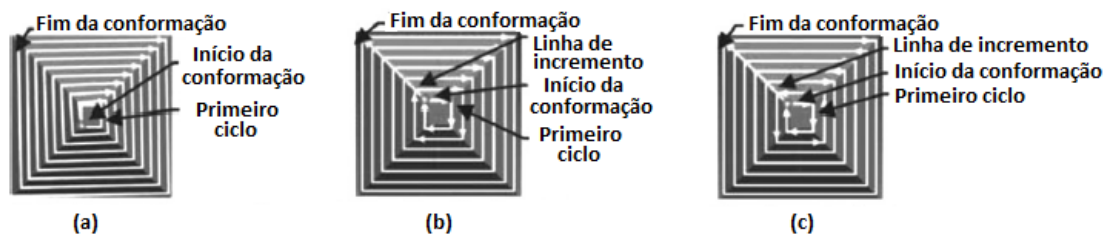


Figura 2.26 / Trajetória da ferramenta [2].

B. Estágios Múltiplos

A aplicação de múltiplos estágios baseia-se numa sequência de operações incrementais de conformação às quais se podem associar diferentes métodos e trajetórias até   obtenção do produto final. Este processo traduz-se num aumento dos ficheiros *CAD* necessários para conformação de geometrias intermédias. O número de estágios intermédios deve ser o mais reduzido possível de forma a evitar um desgaste excessivo da superfície da chapa. No entanto quanto mais reduzido for, maiores são as hipóteses de enrugamento e rotura [15, 16].

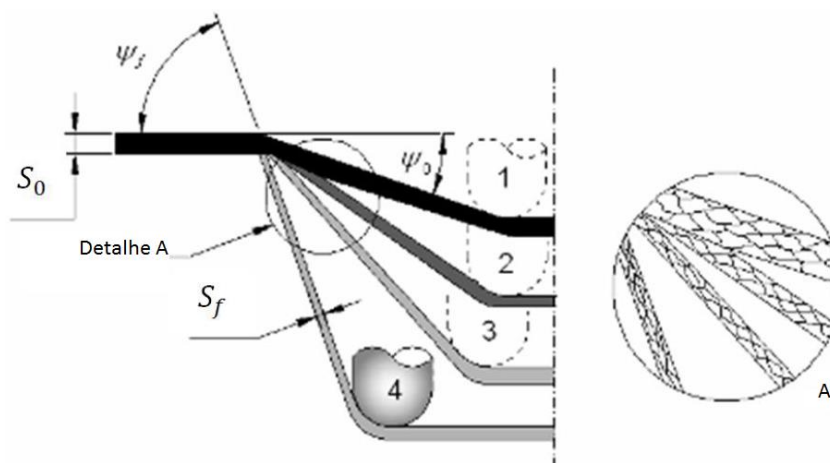


Figura 2.27 / Estampagem incremental em múltiplos estágios [17].

2.3.2.3 Limites de Conformação

Com os limites de conformação podem utilizar-se duas referências: a ferramenta ou o material. A seleção de referência determina os parâmetros críticos do processo.

A. Limite da Ferramenta

DIÂMETRO DA FERRAMENTA

A escolha do diâmetro da ferramenta é determinante para o acabamento superficial. De acordo com vários autores, para o mesmo valor incremental, quanto maior o diâmetro da ferramenta, melhor a qualidade superficial final. No entanto, para um diâmetro demasiado elevado torna-se difícil a execução de detalhes finos na peça. A Tabela 2.6 faz alusão a alguns autores e aos diâmetros de ferramenta por eles utilizados [18].

Tabela 2.6 / Diâmetros de ferramentas estudados [18].

Investigadores	Ano	Diâmetro da Ferramenta (mm)
Kim e Park	2002	5, 10 e 15
Lamminen	2003	10 e 20
Hirt		6, 10 e 30
Carrino	2004	5 e 10
Pohlak		12 e 20
Allwood	2005	10, 20 e 30
Duflou		12.7
Jeswiet		12 e 12.5
Ambrógio	2006	10 e 20
Ambrógio	2007	12 e 24
Duflou		10

INCREMENTO VERTICAL

No decorrer do processo, a conformação incremental é originada quando a ferramenta segue trajetórias segundo os principais eixos de trabalho, trabalhando no plano segundo XY e movimentando-se incrementalmente segundo a vertical (eixo Z). A Figura 2.28 representa a criação de sucessivos passos incrementais que originam a formação de uma crista proporcional.

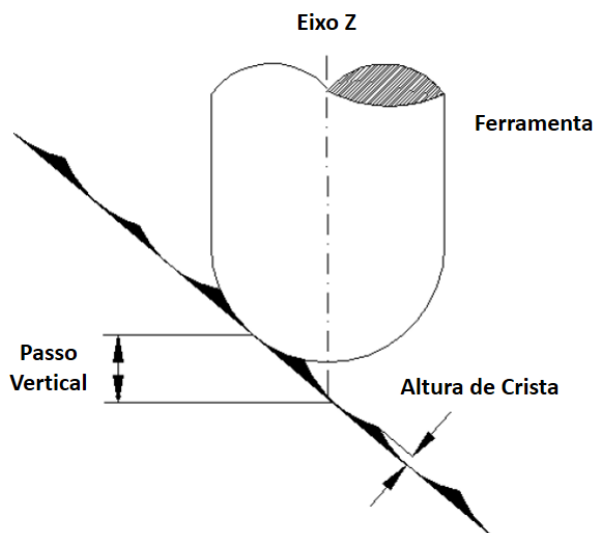


Figura 2.28 / Representação do passo incremental [18].

Objetivamente a utilização de diferentes tipos de trajetória da ferramenta levam a diferentes resultados no acabamento superficial. Um estudo realizado por *Attanasio, Ceretti e Giardini* [19], compara duas sequências, na primeira um incremento vertical constante e a segunda, com um incremento vertical variável, como indicado na Figura 2.29.

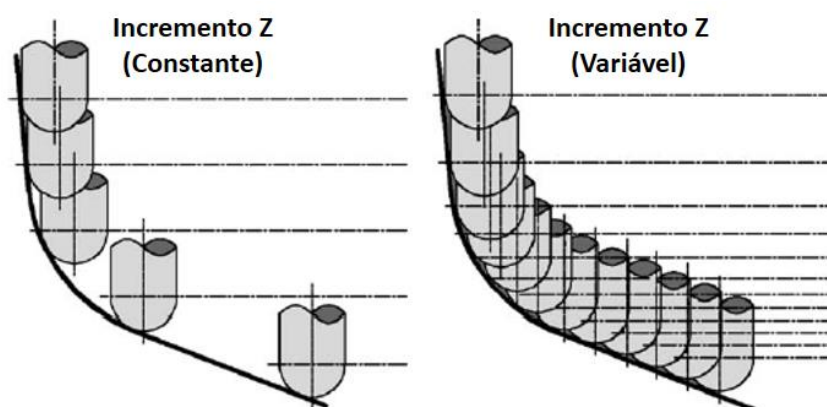


Figura 2.29 / Duas variantes do caminho de trabalho [19].

O primeiro método apresenta desvantagens associadas ao aspeto final da folha metálica, onde as marcas de transição entre camadas consecutivas são visíveis e a qualidade das superfícies é relativamente reduzida. Na segunda opção, é sugerido um processo com incrementos variáveis, mantendo uma altura de crista uniforme e reduzindo as desvantagens indicadas no primeiro passo, resultando num melhor acabamento superficial. Quando menor o ângulo de inclinação da superfície, menores deslocções os

valores dos passos incrementais segundo a vertical (Δz) e a horizontal (Δx), beneficiando o acabamento superficial, Figura 2.30 [19]

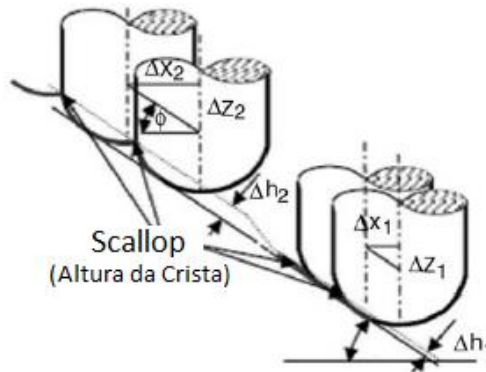


Figura 2.30 / Estudo da altura de crista [19].

VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

A velocidade de rotação da ferramenta determina o atrito entre a ferramenta e a chapa, o aumento da temperatura e, por conseguinte no ponto de contato. O aumento da velocidade de rotação da ferramenta em níveis exequíveis pela própria máquina, pode conduzir a um aumento da temperatura e uma redução nos valores de atrito, facilitando o processo de conformação [20, 21].

VELOCIDADE DE AVANÇO

Para valores constantes da velocidade de rotação da ferramenta, uma velocidade de avanço demasiado elevada torna o processo de conformação da chapa mais complicado, pois o seu aumento pode conduzir a uma redução da temperatura no ponto de contato e um aumento do nível de atrito [20].

A velocidade de avanço é equivalente às velocidades de corte das máquinas ferramenta, havendo um impacto direto no tempo de formabilidade. Esta velocidade é expressa em milímetros por minuto (mm/min) [21]; tendendo a variar entre 500 e 4000 mm/min. Tendo em conta os problemas de formabilidade para velocidades muito elevadas, os valores mais comuns variam entre 1000 e 2000 mm/min [22-24].

LUBRIFICAÇÃO

No processo de conformação *ISF*, a lubrificação é um dos aspetos mais determinantes para a diminuição do atrito, a redução do aquecimento entre peças, a minimização do desgaste da ferramenta, melhor acabamento superficial, estabelecendo uma menor força de trabalho [24-26].

B. Limite do Material

Os materiais influenciam de forma relevante este processo, sendo o seu estudo baseado, na determinação do ângulo máximo de estampagem, função da espessura da chapa na geometria da peça.

ÂNGULO MÁXIMO DE ESTAMPAGEM

O ângulo máximo de estampagem é dependente do comportamento do material e das variáveis do processo *ISF* definidas. Baseia-se na determinação do alongamento máximo da parede antes da ocorrência de fratura ou estricção. Após ultrapassado o limite máximo angular, dá-se o aparecimento de microfissuras localizadas que por fim conduzem à fratura [26].

Estudos realizados por vários autores apontam que no caso de SPIF no estudo da fratura deve considerar-se curva limite de fratura – *Forming Limit Diagram (FLD)*, e a lei dos senos [27], equação (1), que relaciona a espessura da chapa com o ângulo de inclinação (φ). A Tabela 2.7 demonstra resultados que certos autores obtiveram em determinados materiais.

$$t = t_0 \times \sin(90 - \varphi) \quad (1)$$

t (mm) – espessura da chapa após conformação

t_0 (mm) – espessura inicial da chapa

φ (°) – ângulo de inclinação após conformação

Tabela 2.7 / Materiais avaliados [9].

Autores	Material	φ (°)	FLD₀	t_0 (mm)
Filice	AA 1050-O	67,5	2,305	1,21
Hirt	DC04 (Aço Macio)	65,0	1,000	1,00
Jeswiet	Al 3003-O	67,0	-	0,93
		71,0	3,000	1,21
		72,1	-	1,30
		78,1	-	2,10
	Al 5182-O	63,0	-	0,93
	Al 5754-O	62,0	-	1,02
Micari	AA 6114-T4	60,0	0,841	1,00
	DDQ	70,0	2,718	1,00
	HSS	65,0	1,924	1,00
	Cobre	65,0	1,808	1,00
	Bronze	40,0	0,701	1,00

Ângulos maiores de estampagem foram obtidos pelo processo de estampagem incremental de dois pontos por múltiplos estágios, atingindo um ângulo máximo de estampagem de 81° em chapas de alumínio (A1050-H14), como pode ser visto na Figura 2.31 [15].



Figura 2.31 | Prisma quadrangular com ângulo de parede de 81° [15].

ESPESSURA DA CHAPA

Com o avanço da conformação plástica na chapa, dá-se uma redução da sua espessura fruto do alongamento da parede lateral. O estudo deste parâmetro está também relacionado com a lei dos senos [9].

A utilização de chapas com maiores espessuras, associadas à estampagem incremental em múltiplos estágios são estratégias para evitar rotura e atingir ângulos de parede superiores ao *FLD* [9, 18].

GEOMETRIA DA PEÇA

A não utilização de uma matriz, permite a obtenção de peças estampadas com geometrias de grande complexidade, Figura 2.32 [9]. As geometrias obtidas têm como única limitação o diâmetro da ferramenta, sendo que, o raio mínimo da peça depende do raio mínimo da extremidade da ferramenta [28].

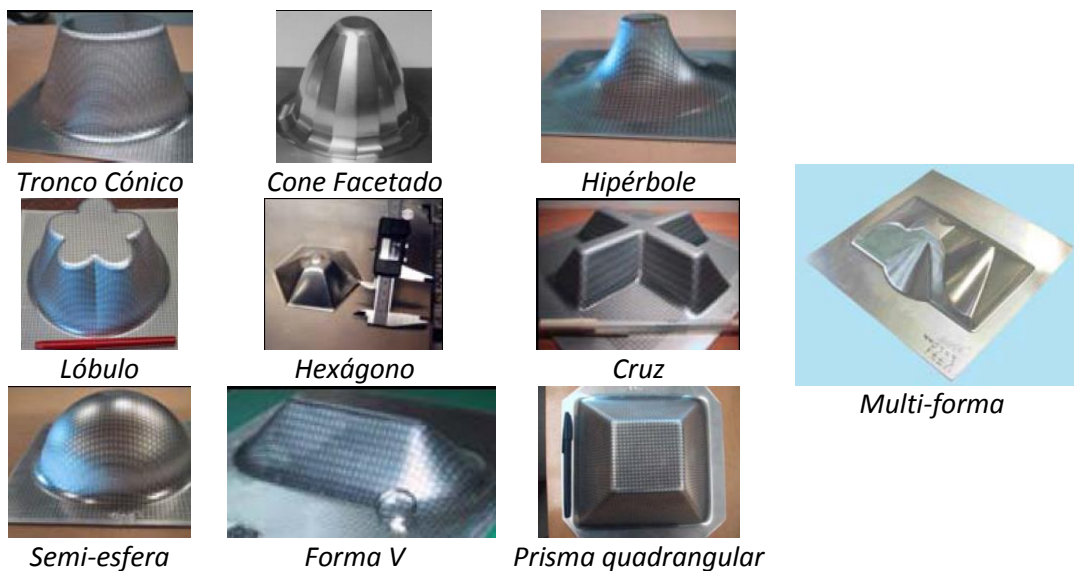


Figura 2.32 | Geometrias adquiridas pelo processo ISF [9].

2.3.2.4 Material a Conformar

Os materiais mais utilizados nos vários estudos de *ISF* até ao momento foram o alumínio [29], o magnésio [30, 31] e o titânio [26, 32]. Estes estudos estabeleceram os parâmetros operacionais principais e a caracterização dos limites do processo de formabilidade [2].

De entre estas, as ligas de alumínio são as mais utilizadas pelo processo *ISF*, uma vez que as suas características mecânicas permitem uma melhor formabilidade e requererem um menor esforço do equipamento em uso [2].

2.3.2.5 Ferramenta

A. Rígida

O estudo de ferramentas para aplicação no processo *ISF* sofreu um grande desenvolvimento na última década. Inicialmente, a ferramenta utilizada apenas se movia em torno da peça sem qualquer rotação a ela associada (Figura 2.33), no entanto foram necessárias melhorias de modo a evitar o aparecimento precoce de fendas [32].

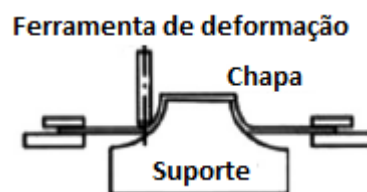


Figura 2.33 | Método do suporte [32].

Murata 1999 [32], aplica uma ferramenta de contorno com múlti-cabeça, Figura 2.34. A aplicação deste método tem como objetivo a deformação da chapa através de um centro *CNC* que desenha sobre a chapa o produto que queremos obter. À medida que a chapa é conformada, a espessura da sua parede vai diminuindo, fruto do alongamento. O autor sugere utilização de uma outra ferramenta (ferramenta de contorno), ligada em oposição com a ferramenta principal, acompanhando-a como um apoio ao longo do processo.

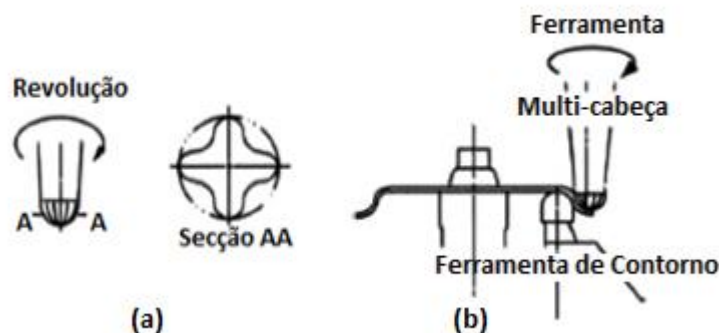


Figura 2.34 | Ferramenta multi-cabeça (a), esquema representativo (b) [32].

Outra estratégia consiste na utilização do aquecimento da ferramenta através da aplicação de uma corrente contínua, que quando entra em contato com a chapa gera uma enorme densidade de corrente que eleva a sua temperatura (Figura 2.35). Esta corrente é aplicada de modo pontual originando assim o aumento da ductilidade do material [33].

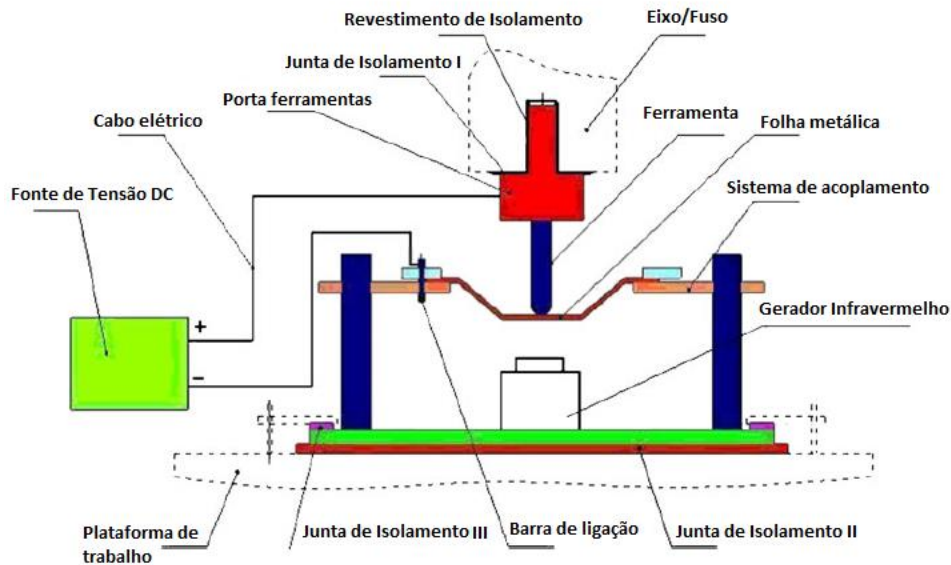


Figura 2.35 / Conformação elétrica quente [33].

Dufrou 2007 [34] apresentou outra estratégia com base no método de conformação plástica assistida por laser, que se baseia num gradiente de temperatura gerado localmente na superfície de uma chapa metálica, com um feixe laser (Figura 2.36), que induz deformação plástica do material [35].

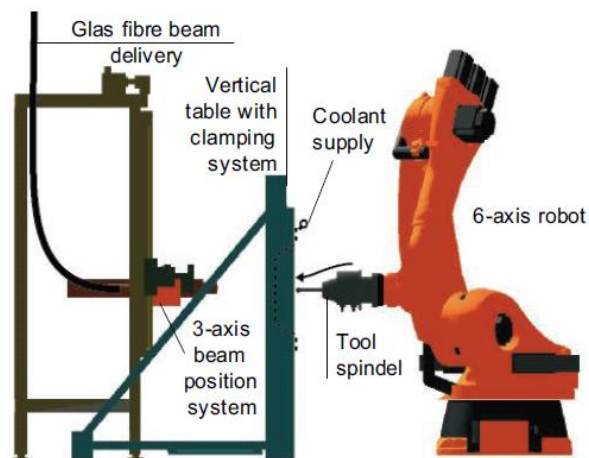


Figura 2.36 / Processo de conformação por laser aplicado ao processo ISF [34].

Este processo pode também ser usado para fazer reparações ou alterações em componentes de chapa. As suas principais desvantagens são os custos do suporte de conformação, a necessidade de pessoal qualificado, o consumo de energia elevada, a necessidade de equipamentos de proteção pessoal e a necessidade de segurança (por vezes) de pré-revestimento da folha de metal, a fim de melhorar o acoplamento de absorção. Alguns destes problemas foram resolvidos com sucesso ao substituir o laser por um arco de plasma [36]. Com este processo conseguiram-se melhorias na formabilidade dos materiais [2].

Na sua generalidade o processo ISF utiliza ferramentas de extremidade com perfis de geometria cônica, cilíndrica, hemisférica e esférica (Figura 2.37 e Figura 2.38). O aço de cementação é um dos materiais mais frequentes onde, em vista à redução de atrito e

aumento do tempo de vida útil da ferramenta. Também são aplicadas ferramentas constituídas por materiais poliméricos, os quais evitam reações químicas com a chapa e aumentam a qualidade superficial final. Na seleção do diâmetro da ferramenta, deve ter-se em consideração o menor raio de concavidade existente no produto final, influenciando assim o acabamento superficial. Os diâmetros mais comuns variam entre os 6 – 100 mm; usualmente são empregues diâmetros de contato cerca de 12 – 12,5 mm [9].



Figura 2.37 / Ferramenta de aço de cementação e material polimérico [9].

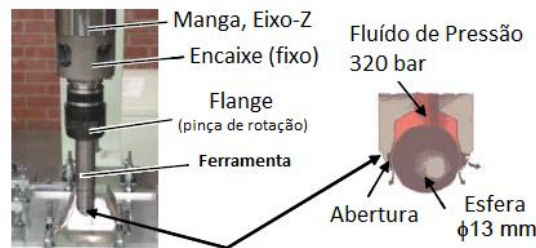


Figura 2.38 / Ferramenta esférica universal [9].

B. Jato de água

A instalação experimental para a conformação por jato de água – *Water Jet (WJ)* – consiste na composição de um mecanismo com três componentes principais, a bomba de alta pressão capaz de fornecer um fluxo de volume constante a pressão máxima, um controlador e uma mesa de trabalho com dois eixos *CNC* no plano horizontal e um eixo manual segundo o plano vertical. Este processo de conformação é semelhante à conformação por laser, havendo a substituição do laser por um jato de água, como podemos observar na Figura 2.39 [9].

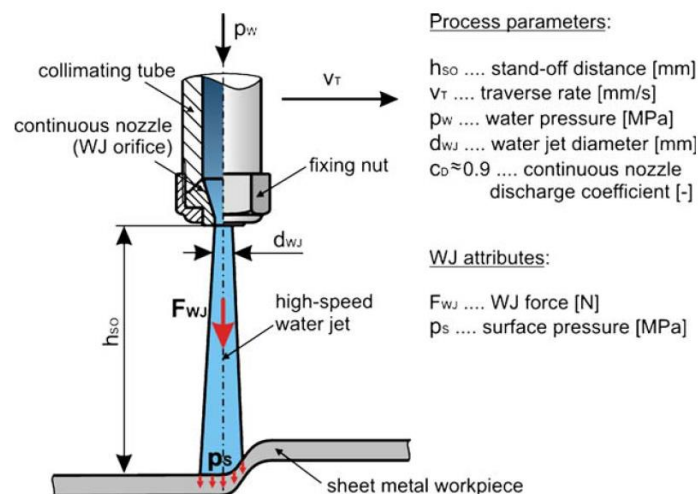


Figura 2.39 / Conformação por jato de água [9].

Como vantagens aposta: maior flexibilidade, melhor integridade de superfície, menor necessidade de maquinagem, menores custos de equipamentos e menor impacto ambiental. Por outro lado, o *WJ* é menos preciso, tem um maior consumo de energia e leva mais tempo do que o processo *LF* [37].

2.3.2.6 Simulação

A introdução de simulação através do método dos elementos finitos (*MEF*) na análise de processos tecnológicos, quando aplicado corretamente, implica ganhos muito significativos, com vista a reduzir o número de ensaios práticos necessários até se atingir uma otimização do processo.

Uma perspetiva mais alargada implica o conhecimento adequado do processo, da sua tecnologia e também de modelos matemáticos que permitam concretizar as simulações pretendidas [38].

A sua aplicação inclui as seguintes fases:

A. Pré-processamento

Definição da geometria do problema, indicando as propriedades dos materiais em uso, o tipo de elementos e a criação da malha.

B. Análise/Solução

Introdução das condições fronteira (forças aplicadas, zonas de encastramento, etc.) e cálculo dos resultados.

C. Pós-processamento

Leitura dos resultados finais que podem ser muito próximos dos valores reais. Como meio de aproximação desses resultados e redução do tempo de simulação, implementa a discretização da malha generalizada aos pontos em estudo, e o método direto de subestruturação permitindo assim uma melhor aproximação. A estratégia destinada a manter o número de elementos tão baixo possível durante a simulação [2].

2.3.3 Vantagens e limitações do processo

A implementação deste tipo de processo de conformação plástica acarreta algumas vantagens e desvantagens relativamente a outros processos de conformação, assim como, relativamente aos processos convencionais de conformação plástica [9].

a) Vantagens:

- i) Utilização de centros CNC convencionais;
- ii) O tamanho das peças a trabalhar é limitado pelo alcance da máquina;
- iii) Mudanças no desenho podem ser facilmente implementadas, originando uma grande flexibilidade de inclinação;
- iv) A operação é relativamente livre de ruídos;
- v) As forças de contato não aumentam pois como é um processo incremental estas mantêm-se reduzidas a esse ponto;
- vi) A zona plástica de contato incremental contribuiu para o aumento da formabilidade, tornando mais fácil a formabilidade de chapas;

- vii) Superfície de acabamento pode vir a ser melhorada;
 - viii) Este processo não requer qualquer tipo de matriz, apenas necessita de uma placa de apoio, entre o cerra-chapas e o suporte.
- b) Limitações
- i) Tempo de fabrico é demasiado elevado;
 - ii) Processo limitado a pequenos lotes;
 - iii) A formação de inclinações é maioritariamente formada por passagens múltiplas da ferramenta;
 - iv) O efeito *springback* é notável, contudo têm sido feitos esforços e estudos para contornar este problema.

2.3.4 Principais aplicações do processo

Como referido anteriormente, a utilização deste processo é muito restrita, estando sobretudo comprovada a sua aplicabilidade na produção de protótipos ou de pequenos lotes de peças. O seu campo de aplicação tem maior ênfase nos setores aeroespacial e automóvel. Não é conhecido qualquer estudo sobre a aplicabilidade desta tecnologia para a produção específica de componentes para moldes.

A. Aplicabilidade na indústria automóvel

A aplicabilidade na indústria automóvel parte para a formação de componentes com um determinada complexidade geométrica, que porventura traria a criação de um molde para futura estampagem. Assim dado o baixo custo de produção, de uma única peça pelo processo *ISF* é possível produzir componentes como: guarda-lamas, capô, suporte de farol, entre outras peças que são de grande utilidade na indústria de personalização automóvel [22, 28].

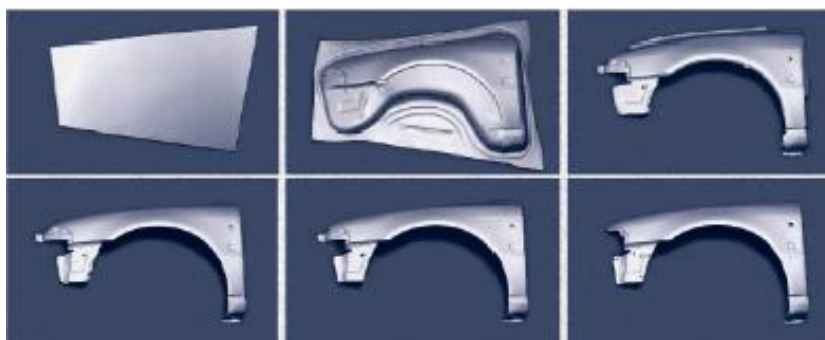


Figura 2.40 / Exemplo 2 do processo na área automóvel [26, 28].



Figura 2.41 / Exemplo 2 do processo na área automóvel [9].

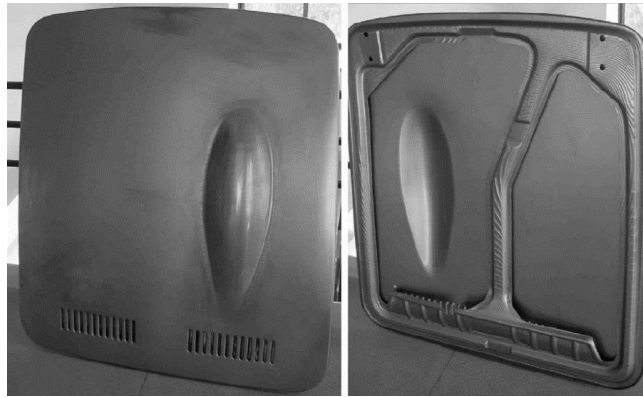


Figura 2.42 / Exemplo 3 do processo na área automóvel .

B. Aplicabilidade na indústria aeroespacial

A introdução deste processo de conformação na indústria aeroespacial tem sido cada vez mais utilizada, como é o exemplo de parte de um pequeno tubo de ventilação (Figura 2.43).



Figura 2.43 / Tubo de ventilação [24].

C. Aplicabilidade na medicina

A facilidade de implementação do processo advém com grande aplicabilidade na medicina, onde todo o conceito do processo incremental se coloca em prática na construção de peças únicas (próteses) de acordo com as necessidades físicas de cada cliente, Figura 2.44.



Figura 2.44 / Prótese de um tornozelo [39].

2.4 *Trade-off* técnico-económico e sistema de classificação

O conceito *trade-off* é muito utilizado na literatura económica, associado a inúmeras apreciações, envolvendo conflito de seleção escolha entre diversos requisitos [40].

Para a análise de *trade-off* técnico-económico é necessário a definição de requisitos importantes, os quais permitam uma ligação entre todos os processos de obtenção de moldes *RIM*. A criação de requisitos parte do princípio de criação de variáveis, as quais são características ou atributos que podem tomar diferentes valores ou categorias [41].

O processo de classificação baseia-se na necessidade de associar um valor a cada variável, de forma a expressar a qualidade ou quantidade dos dados. Assim, ao categorizar uma variável, é necessário primeiro avaliar a natureza dos seus valores, os quais, se forem qualidades ou símbolos produzem variáveis qualitativas, ou, caso contrário produzirem variáveis quantitativas [42].

As variáveis mais significativas para a avaliação dos processos utilizados na obtenção de moldes *RIM*, são as seguintes:

- Custo – relaciona o custo associado à construção de cada molde;
- Matéria-prima – material utilizado na construção de cada molde;
- Contra saídas – relaciona a facilidade de obtenção de contra saídas em cada molde;
- Alterações Futuras – relaciona a facilidade de modificações nas cavidades moldantes;
- Acabamento superficial – relaciona o acabamento superficial obtido por cada processo;
- Tempo de Construção – relaciona o tempo de construção de cada molde;
- Durabilidade – relaciona o tempo de duração de cada molde, sem necessidade de intervenções de manutenção;
- Eficiência – relaciona a eficiência de trabalho de cada molde.

2.4.1 Interpretação de dados

Segundo Herrero and Cuesta [43], um sistema de classificação deverá estar organizado por quatro níveis.

- Nível 1: A variável (qualidade que se pretende medir);
- Nível 2: O atributo (modalidade onde se manifesta a propriedade medida);
- Nível 3: O valor (expressão do atributo sob a forma numérica);
- Nível 4: A relação (relacionamento dos vários valores de variável).

De um modo geral a classificação dos atributos é definida por intermédio de diferentes regras, escalonadas de forma nominal, ordinal, intervalar e razão [43]:

- Escala Nominal – Unicamente classificativa, pode ser comparada utilizando relações de igualdade ou diferença;
- Escala Ordinal – Mede uma determinada característica;
- Escala Intervalar – Definida de forma quantitativa de registar um fenómeno;
- Escala de Razão – Definida em termos da diferença entre o ponto zero e uma intensidade conhecida.

A escala nominal é a mais indicada para a análise dos processos de moldação, servindo de método de comparação das variáveis apontadas no ponto 2.4. A Tabela 2.8 faz alusão à escala nominal, que será aplicada na avaliação comparativa dos diferentes processos de fabrico para obtenção de moldes de reação por injeção.

Tabela 2.8 / Interpretação dos coeficientes de avaliação.

Atributo	Valores
Excelente	1
Ótimo	2
Razoável	3
Mau	4
Péssimo	5

A aplicabilidade do *ISF* e dos processos alternativos mais comuns a aplicar em moldes para os produtos à base de espuma deverá ser avaliada, em função do conjunto de variáveis acima apresentadas. O resultado é apresentado na Tabela 2.9, que permitiu a comparação entre estes processos.

De acordo com os dados formulados, quanto menor a classificação adquirida por um processo de fabrico para obtenção de moldes *RIM*, melhor será a sua classificação.

A Tabela 2.9, apresenta o resultado da análise comparativa das diversas variáveis qualitativas dos diferentes processos de fabrico de moldes *RIM*.

Tabela 2.9 | Trade-off técnico-económico à análise comparativa dos diferentes processos de fabrico para obtenção de moldes de reação por injeção.

Trade-Off		Processo de fabrico para obtenção de moldes RIM			
		Metalcoating	Fibra de Vidro	Alumínio	ISF
Preço	Matéria-Prima	2	3	3	1
	Contra Saídas	1	1	3	5
	Alterações Futuras	4	2	3	2
	Acabamento Superficial	3	4	2	2
	Tempo de Construção	3	3	4	2
	Durabilidade	3	3	2	1
	Eficiência	4	3	1	1
Matéria-Prima	Contra Saídas	2	2	3	4
	Alterações Futuras	4	2	3	1
	Acabamento Superficial	4	4	1	2
	Tempo de Construção	2	2	3	3
	Durabilidade	4	3	1	1
	Eficiência	4	3	1	1
Contra Saídas	Alterações Futuras	4	1	3	2
	Acabamento Superficial	3	4	1	2
	Tempo de Construção	3	2	3	3
	Durabilidade	4	3	1	2
	Eficiência	2	2	2	2
Alterações Futuras	Acabamento Superficial	4	3	2	1
	Tempo de Construção	4	2	3	2
	Durabilidade	4	3	1	2
	Eficiência	4	2	3	2
Acabamento Superficial	Tempo de Construção	3	3	1	2
	Durabilidade	4	3	1	1
	Eficiência	3	3	1	2
Tempo de Construção	Durabilidade	4	3	2	2
	Eficiência	3	2	1	1
Durabilidade	Eficiência	3	3	1	1
Somatório da Classificação (Σ)		92	74	56	53
Média Classificativa (\bar{x})		3,29	2,64	2,00	1,89

Após uma análise detalhada de todos os requisitos e atribuição de valores ente os diferentes processos de fabrico enunciados na Tabela 2.9, realizou-se uma média ponderada de todas as classificações. Sendo que, o processo de fabrico *ISF*, apesar de algumas limitações apresenta-se como um processo favorável à viabilidade de construção para moldes *RIM*.

2.4.2 Estimativa de Custos

A precisão dimensional é um dos fatores mais importantes na concepção de moldes de injeção. O seu aumento pode refletir-se no aumento do tempo de produção do molde e por conseguinte, no seu custo.

Na estimativa do custo global podem concluir-se dois métodos básicos de previsão [44]:

- Função de custos: assume uma dependência entre os custos do molde e as suas características. Esta dependência é expressa numa função matemática. As características são variáveis independentes que determinam o custo.
- Similaridade de custos: começa com o cálculo do custo de um molde de injeção e as suas características. Compara as peças a trabalhar do novo molde, com peças que já foram trabalhadas antes para outros moldes.

O custo final do molde pode ser obtido por condições complementares entre os dois métodos de previsão, agrupando moldes de injeção similares ou componentes do mesmo tipo, de forma a determinar uma função de custo associada a cada grupo, distinguindo classes de custos e tipos de custos básicos ou suplementares, Figura 2.45 [44].

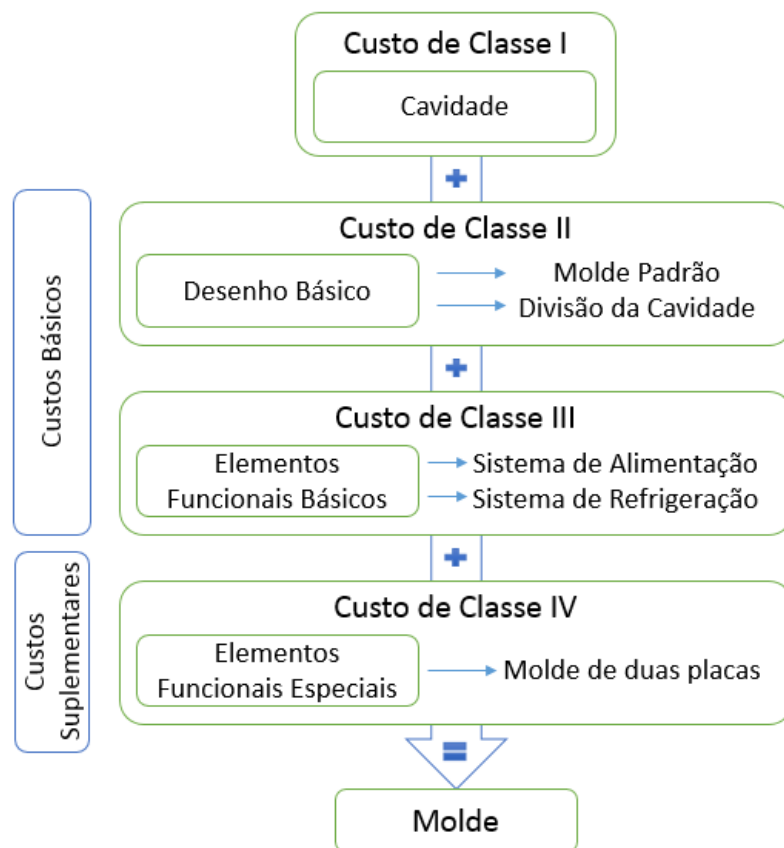


Figura 2.45 | Classes de custos de um molde [44].

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo proceder-se-á ao levantamento das especificações das peças-tipo a utilizar como casos de estudo, para o futuro desenvolvimento de um novo tipo de molde. Esta tarefa permitirá definir requisitos do processo de estampagem incremental em chapa, através de um estudo das características dos produtos a obter.

Para a definição das especificações do produto, será adotada uma metodologia segmentada em três etapas distintas, nomeadamente:

- Apresentação das peças-tipo (Casos de estudo);
- Recolha de informação referente aos processos concorrentes;
- Definição dos critérios de seleção.

Desta forma, assegura-se uma íntima ligação entre as necessidades dos produtos e os critérios de seleção, o que possibilitará o levantamento de especificações precisas e mensuráveis para o novo tipo de molde.

3.1 Estratégias de obtenção de moldes por ISF

Um dos principais objetivos deste estudo é a integração de um processo mais competitivo, para a construção do molde, do ponto de estimativa de custos e, para o fabrico de componentes para bancos protótipos.

A estratégia deverá passar pela construção bem delineada e planeada do molde ou partes do molde, associando o novo processo *ISF* (desde a realização de insertos até à realização de meias cavidades), ou outro processo de moldação, a cada componente.

Para a implementação do ISF como processo de fabrico de moldes RIM, foram desenhadas duas estratégias potenciais para a conceção e fabrico do molde:

- Estratégia 1 – Produção modular de um molde: consiste na obtenção de um (a carcaça) ou vários componentes (da carcaça ou insertos), a obter por *ISF*. Poderiam distinguir-se componentes standard de componentes customizados. Esta abordagem obriga ao desenvolvimento de uma estratégia de pós-

processamento e montagem que permita o posicionamento e potencial de união dos componentes, Figura 3.1.

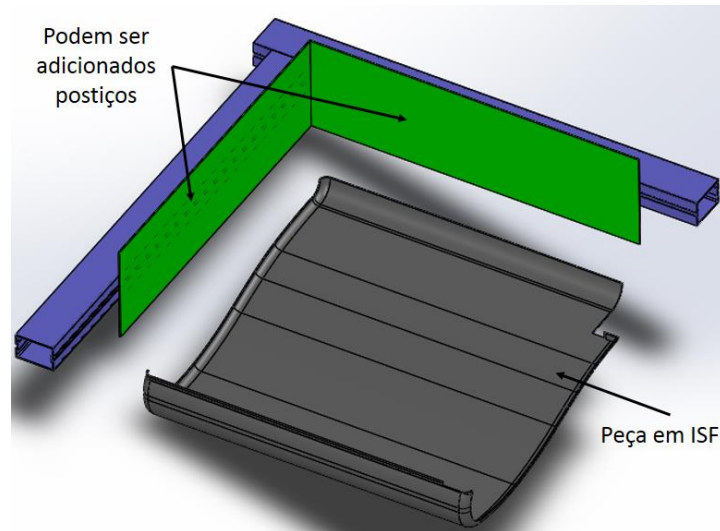


Figura 3.1 | Estratégia 1.

- Estratégia 2 – Produção modular de um produto: consiste na obtenção de vários moldes de menores dimensões, cujos principais componentes seriam obtidos através de *ISF*. Esta abordagem obriga à realização de diversos moldes de injeção, e à integração de um processo de união apropriado para a montagem dos diferentes componentes individuais, de forma a obter um produto final.

A criação de diferentes peças pode tornar-se demasiado dispendiosa ou até impossível através do processo *ISF*, devido à geometria complexa do produto. Deste modo surge a ideia de criar uma fusão entre os diferentes processos de moldação *RIM* já existentes e a estratégia 1.

A seleção da abordagem mais apropriada obriga a um conhecimento profundo das peças-tipo em estudo, relativamente a um conjunto de critérios pré-definidos.

3.2 Seleção do processo de fabrico do molde e viabilidade do ISF

A Tabela 3.1 permite a análise comparativa entre os processos anotados e o ISF para um conjunto de fatores técnicos.

Tabela 3.1 / Passos dos processos de obtenção de moldes do tipo casca.

Parâmetros	Processo de Moldação			
	Metalcoating	Fibra de Vidro	Alumínio	ISF
Modelação	CAD	CAD	CAD/CAM	CAD/CAM
Protótipo	Modelo	Modelo	–	Ferramenta de Suporte
Carcaça	Deposição de Pós	Deposição de Camadas Sucessivas de Fibra e Resina Epóxi	–	Estampagem Incremental (Modular)
Montagem da Carcaça	Montagem em estrutura	Montagem em estrutura	–	Montagem em estrutura
Enchimento da Carcaça	Resina de Enchimento	–	–	Adesão, ou enchimento da caixa com resina ou carboneto de cálcio
Cura	Fase de Cura	Fase de Cura	–	Fase de cura
Acabamento	Remoção do Modelo	Remoção do Modelo	–	–
Pós-processamento	–	–	Maquinagem	Maquinagem; Corte por laser; Soldadura

Face aos requisitos satisfeitos pelos processos anotados, na aplicação do ISF deverão ser considerados os seguintes aspetos relacionados com alguns desses fatores:

a) Material da carcaça:

- Deve ser dúctil, permitindo assim uma melhor formabilidade;
- Deve apresentar uma resistência mecânica apropriada, de modo a garantir a expansão da espuma (espessura mínima de parede ≥ 1 mm; caso seja necessário, deve efetuar-se um tratamento térmico do mesmo);
- Deve apresentar um bom coeficiente de condução térmica de modo a garantir a transferência de calor para o interior do molde.

b) Montagem da carcaça:

- Soldabilidade dos módulos de chapa para espessuras muito finas tornam-se um pouco mais difíceis de soldar – necessidade de um bom soldador;
- Integração do sistema de aquecimento (deve ser ligado através de suportes/apoios);
- Devido à reduzida espessura da chapa torna-se necessário um reforço estrutural da mesma (isto para que, quando se dá a expansão da espuma, se reduza a suscetibilidade a fraturas na cavidade moldante);
- Os módulos devem ser conseguidos com tolerâncias de 1 mm, de modo a garantir as contrações da espuma, assim como, a ligação de soldadura entre módulos;
- A vedação das cavidades deve ser garantida através do plano de apartação (este plano tem que ser construído de modo a garantir a estanquicidade do molde). O plano de apartação deve ser colocado a cerca de 2/3 da altura da peça (pelo menos), deste modo não haverá vazamento de poliuretano para o

- exterior após injeção/expansão. Plano de apartação deve garantir um ângulo de saída de 30° de modo a permitir a interligação entre cavidades moldantes;
- Implementação de velcros é garantida através de pequenos perfis, nos quais são aplicados os velcros (com a expansão da espuma os velcros ficam unidos ao produto final), por vezes há necessidade de integração de arames no interior da espuma para futura ligação do forro do banco;
 - Aplicação de jitos na cavidade moldante superior (estes jitos devem ser colocados de forma estratégica, de modo a garantirem todo o escape de ar proveniente no interior do molde, evitando assim a existência de bolhas de ar no produto final);
- c) Enchimento da estrutura de suporte da carcaça:
- Resina carregada com pós de Al;
 - Aplicação de fibra de vidro;
 - Aplicação de poliuretano (injeção de espuma).
- d) Integração de sistemas de segurança:
- Fechos, dobradiças, cilindros pneumáticos, puxadores.

Em suma, no sentido de promover melhor formabilidade assim como boa resistência mecânica e condutividade térmica, a chapa de alumínio tipicamente usada e demonstrada na introdução e desenvolvimento do *ISF*, parece ser um material conveniente à obtenção deste tipo de moldes por este processo.

A conceção de um molde por *ISF* tem início na elaboração e estudo do ficheiro *CAD/CAM*, a partir do qual será produzida uma carcaça. A robustez desta carcaça deverá ser reforçada com uma montagem estrutural que servirá de suporte, seguida pela aplicação do sistema de aquecimento, em serpentinas, responsáveis por manter uma temperatura constante na cavidade moldante.

Continuamente é efetuado um vazamento na cavidade exterior do molde. Este vazamento serve de estrutura ao molde, mas a sua principal função é garantir o aquecimento das cavidades moldantes, logo este serve como isolante de térmico, direcionando o calor proveniente do sistema de aquecimento para o interior do molde.

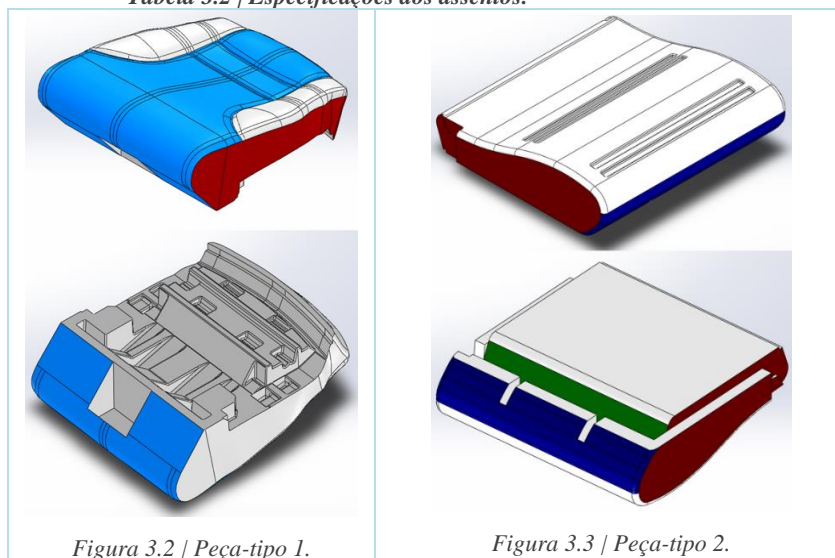
Por fim, são aplicados os sistemas de segurança, os quais devem ser acomodados de modo a facilitar a intervenção/utilização/segurança do molde ao operador (fechos, dobradiças, cilindros pneumáticos, puxadores).

3.3 Casos de estudo

Para a implementação do processo *ISF*, cada peça-tipo será inicialmente avaliada de acordo com os seus requisitos geométricos. Os processos atuais de fabrico de moldes serão usados como referência.

A Tabela 3.2 apresenta duas peças, de tipo assento, as quais dispõem de uma geometria bastante simples na parte superior, como podemos ver na Figura 3.2 e Figura 3.3. Atendendo a todas as especificações mencionadas no capítulo 2.3 sobre o processo *ISF*, as paredes laterais (indicadas a vermelho) trazem limitações à construção do produto final por este processo.

Tabela 3.2 / Especificações dos assentos.



Especificações	Peça-tipo 1	Peça-tipo 2
Dimensões no Plano	461 x 542 mm	510 x 496 mm
Profundidade	194 mm	133 mm
Inclinação de parede	90 °	
Processo de fabrico atual (Molde)	Molde de alumínio	Molde de fibra de vidro
Contração da espuma	1 - 2 %	
Material de Injeção	Poliuretano Flexível	

Através de uma análise mais pormenorizada pode-se entender que, as paredes laterais fazem um ângulo muito perto dos 90° com o plano de topo, difícil de obter através do processo *ISF*. A Figura 3.2 permite uma visão sobre a vista de fundo evidenciando diversas reentrâncias na peça, de geometria muito complexa para ser processada pelo processo *ISF*.

Já a peça-tipo 2 apresentada na Figura 3.3, apresenta uma geometria bastante simples em torno de toda a sua superfície superior. No entanto, as reentrâncias localizadas na parte dianteira do assento (apresentada a verde), a curvatura frontal (apresentada a azul) e a parede lateral (apresentada a vermelho), limitam a aptidão do processo *ISF* para a obtenção do respetivo molde destas superfícies.

A peça-tipo 3 representa um encosto de cabeça, cuja geometria complexa apenas se incide nos contornos laterais. A Tabela 3.3 indica as especificações desta peça-tipo. Aparentemente, a obtenção do negativo desta peça através do processo *ISF* deverá estar mais facilitada.

Tabela 3.3 / Especificações do encosto de cabeça.

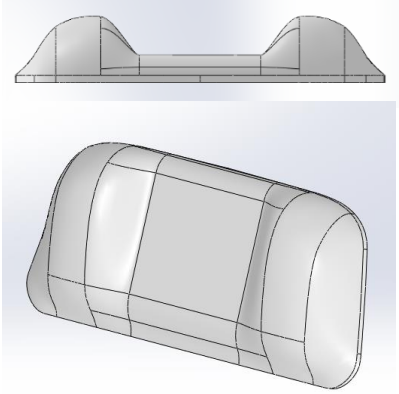
Especificações – Peça-tipo 3		
Dimensões no plano	412 x 195 mm	
Profundidade	74 mm	
Inclinação de parede	75 °	
Processo de fabrico atual (Molde)	Molde de alumínio	
Contração da Espuma	1 - 2 %	
Material de Injeção	Poliuretano Flexível	

Figura 3.4 / Peça-tipo 3.

A Tabela 3.4 apresenta três peças do tipo encosto lombar, as quais dispõem de uma geometria simples na parte frontal do encosto. A geometria, adquire maior grau de inclinação nas abas laterais o que se torna inconveniente na aplicação do processo *ISF*.

Tabela 3.4 / Especificações dos encostos lombares.

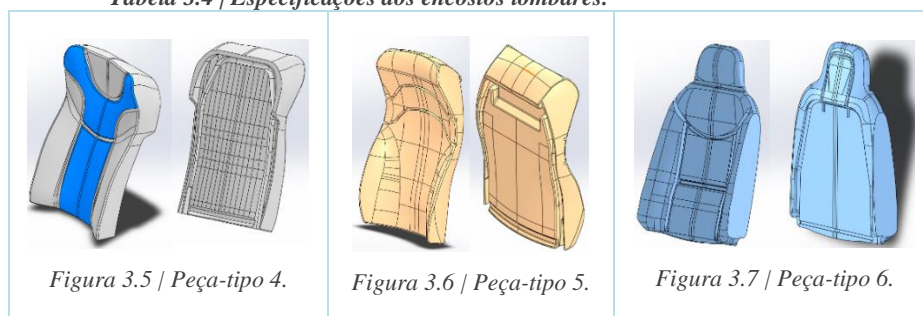


Figura 3.5 / Peça-tipo 4.

Figura 3.6 / Peça-tipo 5.

Figura 3.7 / Peça-tipo 6.

Especificações	Peça-tipo 4	Peça-tipo 5	Peça-tipo 6
Dimensões no Plano	480 x 804 mm	451 x 733 mm	495 x 808 mm
Profundidade	203 mm	167 mm	121 mm
Inclinação de parede	90 °	75 - 105 °	90 °
Processo de fabrico atual	Molde de alumínio	Molde de alumínio	Molde por <i>metalcoating</i>
Contração da espuma	1 - 2 %		
Material de Injeção	Poliuretano		

A vista posterior destas peças-tipo, apresenta também uma geometria bastante simples, na qual todas as reentrâncias podem ser conseguidas através da aplicação de insertos, aplicados na meia cavidade que gera esta superfície.

3.4 Seleção dos casos de estudo a trabalhar

Nesta secção descreve-se o processo de seleção dos casos de estudo com maior ênfase, para aplicação do processo *ISF*. A partir do levantamento de informação relativamente às peças-tipo, efetuado no capítulo 3.3, foi selecionada uma peça-tipo de cada género (um assento, um encosto de cabeça e um encosto lombar).

Nesta análise foram considerados aspetos como a geometria da peça, a profundidade, o ângulo máximo de parede, a necessidade de utilização de ferramentas (matriz) e a necessidade de rotação da peça para nova conformação.

O processo de medição utilizado para o cálculo das profundidades, teve como base a criação de um plano tangente à superfície a obter por *ISF*, ver Figura 3.8, seguido de uma medição entre o ponto mais baixo da superfície e o plano. O mesmo processo foi realizado para obtenção dos ângulos de parede. Várias medições foram efetuadas, de forma a minimizar o erro entre as superfícies e os planos.

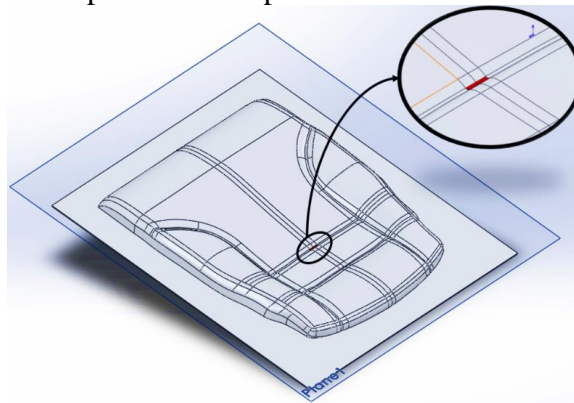


Figura 3.8 | Exemplo do cálculo da profundidade.

A necessidade de utilização de ferramentas de apoio ao processo, será sempre representada com uma cor, na zona mais indicada, ver Figura 3.9. Ao observar a Figura 3.10, podemos ver o exemplo de um negativo, representado a azul zona de contacto da ferramenta a utilizar para obtenção do produto final.

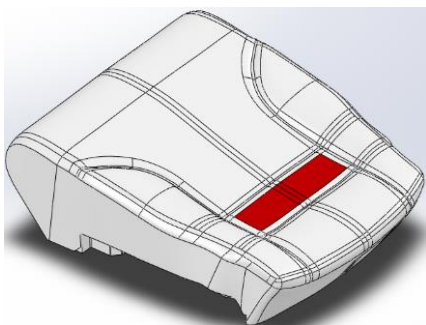


Figura 3.9 | Exemplo, zona demarcada para uso de uma ferramenta (matriz).

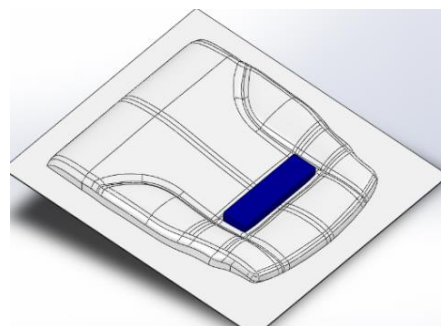


Figura 3.10 | Exemplo, aplicação da matriz.

3.4.1 Assento

Relativamente aos modelos que representam o assento, e à descrição anteriormente proferida (Tabela 3.2), a peça-tipo 1 tem uma geometria da face superior simples, apresenta baixa profundidade e tem um ângulo de parede relativamente praticável por *ISF*. Por sua vez necessita da implementação de uma ferramenta na zona representada a vermelho, Figura 3.11, com o fim de garantir a geometria pretendida. A Figura 3.12 apresenta a geometria posterior bastante mais complexa, a qual deverá ser obtida por um outro processo de moldação.

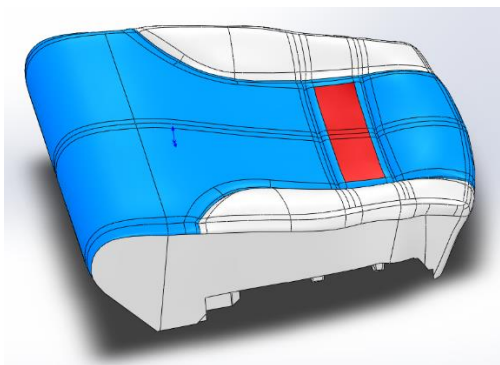


Figura 3.11 | Peça-tipo 1, posição da ferramenta.

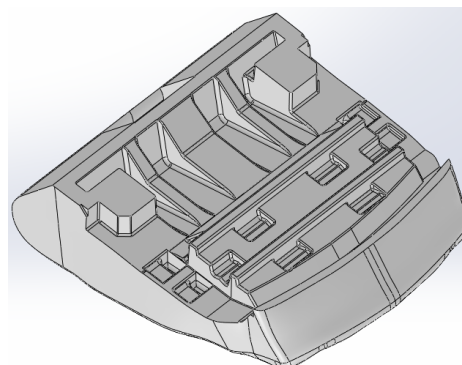


Figura 3.12 | Peça-tipo 1, geometria posterior.

Do mesmo modo, a peça-tipo 2, expõe uma geometria da face superior relativamente simples, a qual apresenta elevada profundidade, ângulo de parede elevado e reentrâncias que dificultam a implementação do processo *ISF*, podendo conduzir à rotura das áreas a vermelho, Figura 3.13. Como tal, de modo a obtermos toda a superfície com apenas uma chapa, será necessária a criação de uma ferramenta a aplicar sobre a superfície representada a azul, Figura 3.14, ou a criação de uma ferramenta com a qual seja possível obter parte da geometria através do processo *SF+ISF*.

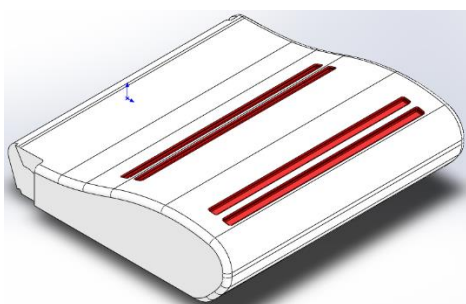


Figura 3.13 | Peça-tipo 2, reentrâncias.

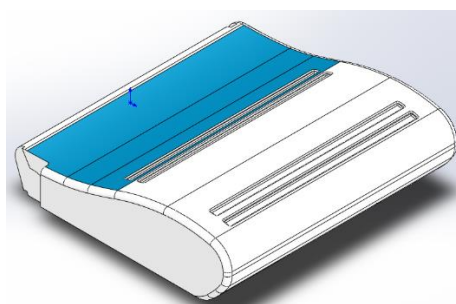


Figura 3.14 | Peça-tipo 2, ferramenta.

Posto isto, a peça-tipo 1 foi a selecionada para implementação do processo *ISF* por meio das estratégias apresentadas, com a qual haverá necessidade de construção de uma pequena ferramenta de apoio.

3.4.2 Apoio de cabeça

A peça-tipo 3 apresenta uma geometria bastante apelativa à conformação por *ISF*, Figura 3.15, pois através de uma chapa única e a aplicação de uma ferramenta na zona de patamar intermédio, é possível obter toda a sua geometria. Isto torna-se mais claro tomando em especial atenção o ângulo de parede nas zonas de maior relevo e toda a zona abaixo do pequeno degrau a azul, Figura 3.16.

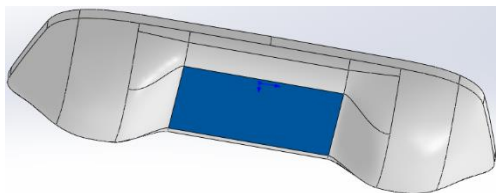


Figura 3.15 | Peça-tipo 3, ferramenta.

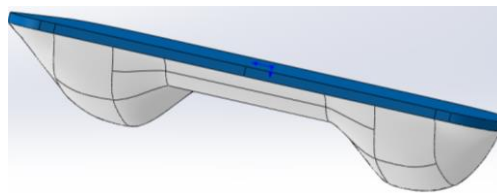


Figura 3.16 | Peça-tipo 3, degrau.

3.4.3 Encostos lombares

No que diz respeito aos encostos lombares, ver Tabela 3.4, todas as peças-tipo apresentam uma geometria superficial simples. Por outro lado, as diferenças mais notáveis nestas peças-tipo são as suas dimensões, profundidades, os diversos ângulos de parede, assim como a geometria das paredes laterais a ser obtidas.

A peça-tipo 4 apresenta ângulos de parede laterais muito elevados, principalmente na zona da cabeceira, com os quais existe a necessidade de repartir a peça em variadas partes, o que possivelmente trará um aumento de mão-de-obra na sua conceção.

A peça-tipo 5 apresenta ângulos de paredes mais consideráveis assim como uma geometria mais simples comparada com as outras peças-tipo.

Quanto à peça-tipo 6, a sua geometria é a mais complicada para implementação do processo *ISF*, pois esta apresenta diversas curvaturas, as quais indiciam diversos ângulos de parede sendo que a maior parte deles não são exequíveis pelo processo *ISF*, assim como existe a necessidade de criação de ferramentas de apoio para conceção da zona de encosto central.

Assim sendo, de entre as três peças, a mais orientada para implementação do processo *ISF* por meio das estratégias apresentadas será a peça-tipo 5, com a qual não haverá necessidade de construção de ferramentas de apoio e onde as ligações associadas ao conceito modular são mais acessíveis de adquirir.

3.5 Análise da viabilidade técnica da implementação ISF

3.5.1 Seleção da matéria-prima

A matéria-prima deve ser selecionada em função da sua versatilidade, durabilidade, resistência mecânica e pelo seu impacto sobre o custo de produção. O alumínio é um metal não-ferroso com grande popularidade e usabilidade, devido à sua larga variedade de aplicações, baixo peso, propriedades físicas, mecânicas e resistência à corrosão [45]. A Tabela 3.5 resume diferentes ligas de alumínio consideradas apropriadas para o processo de conformação mecânica a frio, assinalando os elementos de liga de cada série, assim como, as suas principais características.

Tabela 3.5 / Características das ligas de alumínio [46-48].

Série ou Família	Tipo de Endurecimento	Elemento de Liga	Caraterísticas
1000	Conformação mecânica a frio (Ligas não tratáveis termicamente)	Nenhum	Alumínio puro, não ligado. Os materiais desta família caracterizam-se por possuírem as menores propriedades mecânicas, porém possuem boa soldabilidade, maior condutividade térmica e elétrica, e também maior conformabilidade plástica.
3000		Manganês (Mn)	Ligas industriais que contém como elemento básico de liga o Manganês, o que eleva bastante as propriedades mecânicas das ligas desta família. A liga 3003 é a liga mais representativa desta série, pois a adição de cobre (Cu) aumenta um pouco o limite de resistência, e juntamente com a adição de ferro (Fe) possibilita a obtenção de uma estrutura granular mais fina.

Tabela 3.6 / Propriedades mecânicas das ligas de alumínio [49].

Espessura (mm)	Propriedades Mecânicas							
	1050 A - O		1080 A - O		3003 - O		3203 - O	
	σ (MPa)	A (%)	σ (MPa)	A (%)	σ (MPa)	A (%)	σ (MPa)	A (%)
0,15 – 0,20	55	15	80	15	95 - 130	14	115	14
0,20 – 0,30						18		18
0,30 – 0,50		20		20		20		
0,50 – 0,80				23		23		
0,80 – 1,30		25				25		
1,30 – 2,60		30				30		
2,60 – 3,00		30		35		25		25
3,00 – 6,00				–		–		21
6,00 – 75,00	–	–	–	–	–	–	–	–

Atualmente, é relativamente fácil obter chapas de alumínio nas mais diversas dimensões. Neste caso, o principal parâmetro dimensional a salientar é a espessura de chapa a utilizar. De acordo com as propriedades do alumínio, características da superfície moldante a obter e características do centro de maquinagem disponível, foi admitida uma espessura de 2 mm, de forma a podermos alcançar boa conformidade do material, resistência mecânica e condutividade térmica. Todo o estudo futuramente a realizar sobre a variação da espessura da chapa aquando da conformação decorrerá sobre esta espessura.

3.5.2 Quantidade de matéria-prima

Para o dimensionamento da chapa necessária para cada caso de estudo, foram identificadas as dimensões, profundidade máxima necessária atingir, ângulo de parede, área superficial obtida após conformação e por fim chapa necessária para realização do modelo através de *ISF*.

Através da variação angular e pela aplicação da Lei dos Senos referida na equação 1, foi possível realizar um estudo da variação de espessura da chapa após conformação, admitindo uma espessura mínima a atingir de 0,6 mm, para o cálculo do coeficiente de segurança. Este pressuposto parte do estudo realizado por Li, Li [50] no qual a espessura mínima atingida nos seus ensaios previamente à rotura foi de 0,4750 mm. Logo de forma a garantir a segurança e robustez do produto final, foi considerada a espessura mínima final acima indicada.

$$CS = \frac{t}{0,6} \quad (2)$$

CS – coeficiente de segurança;
t (mm) – espessura da chapa após conformação
0,6 (mm) – espessura mínima a atingir.

3.5.2.1 Peça-tipo 1

As figuras seguintes apresentam diferentes vistas da peça-tipo 1, a partir das quais foi realizado um estudo rigoroso sobre todas as suas superfícies, de modo a simplificar e estudar a melhor estratégia de construção do seu molde.

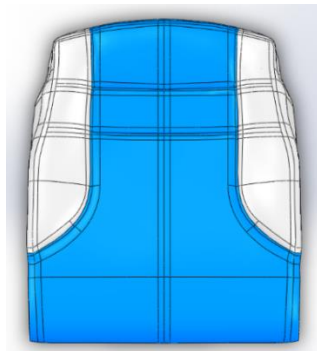


Figura 3.17 | Peça-tipo 1, vista superior.

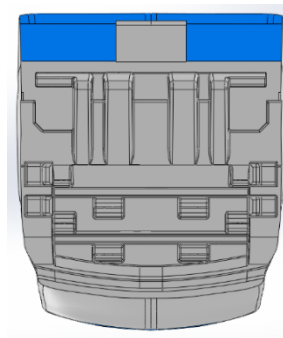


Figura 3.18 | Peça-tipo 1, vista inferior.

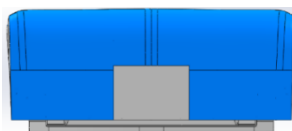


Figura 3.19 | Peça-tipo 1, vista frontal.

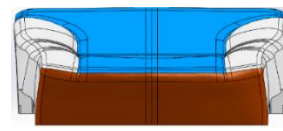


Figura 3.20 | Peça-tipo 1, vista posterior.

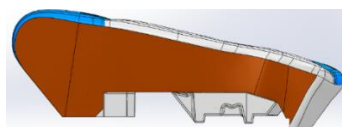


Figura 3.21 | Peça-tipo 1, vista lateral.

Para a concepção do molde da peça-tipo 1 foi necessário proceder a uma recolha de dados, reunidos na Tabela 3.7, de acordo com as figuras acima indicadas. As principais dimensões têm um valor abaixo do indicado para a área superficial. A área superficial corresponde à área da superfície a ser utilizada para a construção do molde. Assim, as principais dimensões especificam as dimensões da chapa a utilizar. As dimensões indicadas na última coluna da tabela (Chapa necessária) diferem em cota de uma distância de cerca de 100 mm, esta diferença é ajustada na chapa como meio de posicionamento na máquina ISF. Estes dados permitem desde logo avaliar a adequação da máquina e ferramentas para o ISF.

Tabela 3.7 / Especificações, peça-tipo 1.

Vista	Dimensões [mm]		Profundidade [mm]	Angulo de Parede [°]	Área superficial [mm²]	Chapa necessária [mm]	
	C ¹	L ²				C	L
Superior	460,00	540,00	33,00	60,00	270632,10	560,00	640,00
Frontal	460,00	175,00	15,00	55,00	66511,01	560,00	275,00
Posterior	390,00	85,00	39,00	53,00	40747,63	490,00	185,00
Lateral	495,00	155,00	23,00	60,00	54460,60	595,00	255,00
Inferior	Não se aplica, superfície bastante complexa.						

A Tabela 3.8 indica o cálculo da variação geométrica e dimensional da chapa a utilizar, incluindo a espessura que a chapa irá atingir após conformação.

Tabela 3.8 / Estudo da variação da espessura da chapa, para peça-tipo 1.

Vista	Amplitude máxima por face [°]	Espessura de chapa [mm]	Coefficiente Segurança [min = 0,6 mm]
Superior	60,00	1,000	1,667
Frontal	55,00	1,147	1,912
Posterior	53,00	1,204	2,006
Lateral	60,00	1,000	1,667
Inferior	Não se aplica		

A vista inferior (Figura 3.18) apresenta uma geometria bastante complexa, pelo que o seu molde deverá ser realizado por um outro processo de moldação. Deve ter-se em atenção qual o processo mais conveniente a ser utilizado, de acordo com a geometria, inclinação dos ângulos de parede, assim como a sua proximidade. Neste caso, o método *metalcoating* pode trazer inconvenientes, uma vez que a posição de projecção de pó de alumínio pode estar mais dificultada, o que poderá originar espessuras não uniformes, pois a deposição de pó de alumínio torna-se bastante difícil.

Assim, os processos mais adequados para conceber esta parte do molde são o método fibra de vidro ou o método da maquinagem em bloco de alumínio. Com o propósito de ser mantida uma baixa massa de toda a estrutura, a melhor opção a utilizar deverá ser o método com fibra de vidro.

¹ O índice C representa o comprimento da superfície.

² O índice L representa a largura da superfície.

3.5.2.2 Peça-tipo 3

A peça-tipo 3 consiste num apoio de cabeça. Através das figuras seguintes, podemos observar a simplicidade geométrica desta peça. Um estudo mais rigoroso sobre toda a peça, resumido na Tabela 3.9, indica que, para obter o molde carcaça para a vista superior por *ISF*, será apenas necessária a aplicação de uma chapa de alumínio.

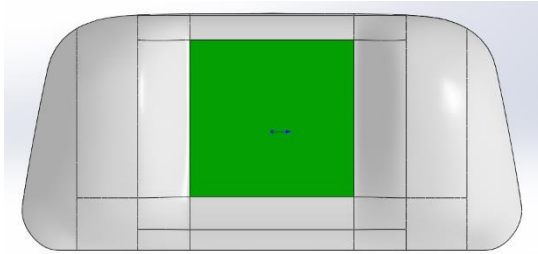


Figura 3.22 / Peça-tipo 3, vista superior.

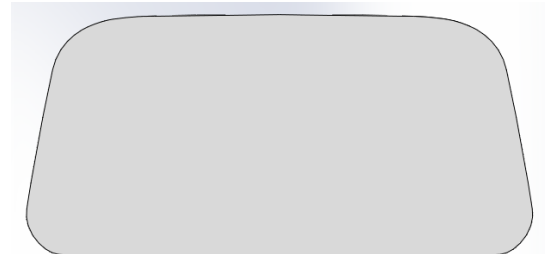


Figura 3.23 / Peça-tipo 3, vista inferior.



Figura 3.24 / Peça-tipo 3, vista frontal.

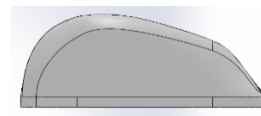


Figura 3.25 / Peça-tipo 3, vista lateral.

A realização do molde desta peça-tipo, por *ISF* será realizada em duas fases: a cavidade inferior e a cavidade superior. A cavidade inferior será facilmente obtida por intermédio do método de conformação de dois pontos (*TPIF*), (capítulo 2.3.2.1 – B), sendo para tal necessária a criação de uma ferramenta (matriz), que apoie a formação do patamar intermédio (a verde), Figura 3.22. Por outro lado, devido ao elevado grau de inclinação das paredes laterais devemos optar por uma trajetória de conformação por múltiplos estágios, (capítulo 2.3.2.2 – B).

Tabela 3.9 / Especificações, peça-tipo 3.

Vista	Dimensões [mm]		Profundidade [mm]	Angulo de Parede [°]	Área superficial [mm²]	Chapa necessária [mm]	
	C	L				C	L
Superior	412,00	195,00	74,00	75,00	98412,57	510,00	295,00
Inferior	412,00	195,00	8,00	90,00	73497,28	510,00	295,00

A realização da cavidade superior será efetuada através de um outro processo de construção de moldes *RIM*. De modo a facilitar a sua construção, e a tornar mais rápida a sua conceção, o método mais apropriado para construção desta cavidade é a maquinagem sobre bloco de alumínio.

Esta construção dará origem a uma cavidade superior rígida, Figura 3.26, mas de pequena espessura. A maquinagem sobre esta cavidade poderá, ser realizada, sobre a sua base (Figura 3.26) e o seu topo (Figura 3.27). Isto é, a maquinagem sobre a base, irá despertar uma cavidade moldante com 8 mm de profundidade e inclinação de parede de 90 °. Um segundo plano será a maquinagem sobre o topo do bloco, ver Figura 3.27, estimulando a eliminação de massa no produto final, tonando-o assim mais leve.

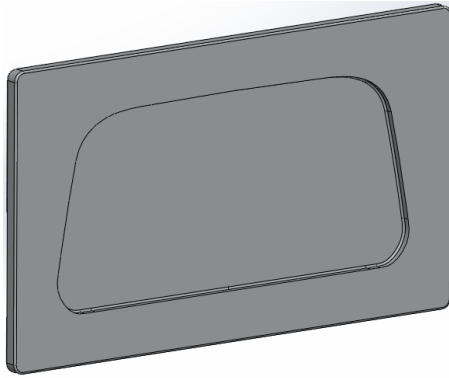


Figura 3.26 / Peça-tipo 3, cavidade moldante superior (base).

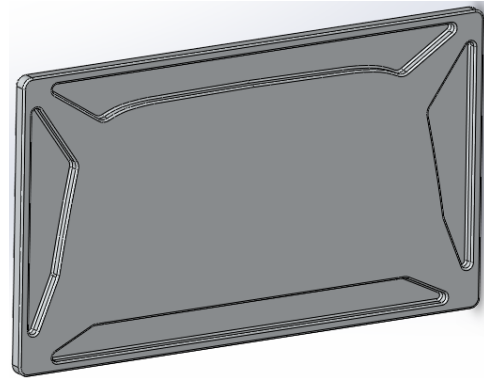


Figura 3.27 / Peça-tipo 3, cavidade moldante superior (topo).

Tabela 3.10 / Estudo da variação da espessura da chapa, para peça-tipo 3.

Vista	Amplitudes máximas por face [°]	Espessura de chapa [mm]	Coefficiente Segurança [min = 0,6 mm]
Superior	75,00	0,518	0,863

Quanto à variação de espessura final da chapa, é de notar que esta ultrapassa a cota referida no início do capítulo 3.5.2, verificando-se assim também uma redução no seu coeficiente de segurança. De certo modo, estes valores tornam a peça um pouco mais frágil, o que por sua vez pode ser combatido pela aplicação de um reforço estrutural, pela implementação do sistema de aquecimento, assim como pelo enchimento da cavidade moldante inferior com um *gelcoat* ou uma espuma de poliuretano semirrígida.

3.5.2.3 Peça-tipo 5

De todos os apoios lombares apontados nos capítulos anteriores, o mais vocacionado para conceção através da implementação do processo *ISF* é a peça-tipo 5. A sua realização poderá ser efetuada de duas formas distintas: uma recorrendo à utilização de uma chapa com dimensões bastante elevadas, ou recorrendo à utilização bipartida das superfícies, dependendo do atravancamento/capacidade da máquina a utilizar.

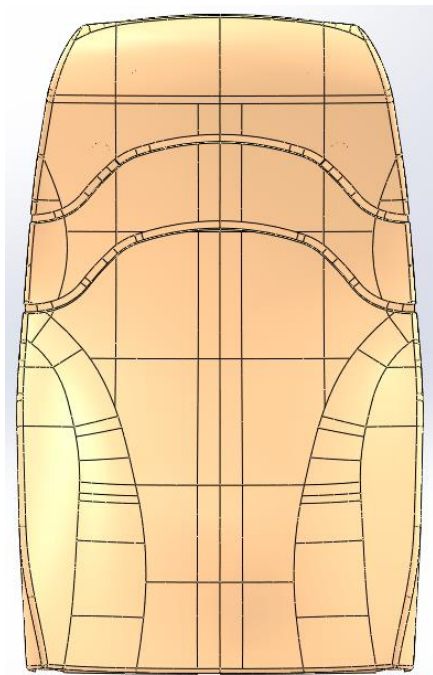


Figura 3.28 / Peça-tipo 5, vista superior.

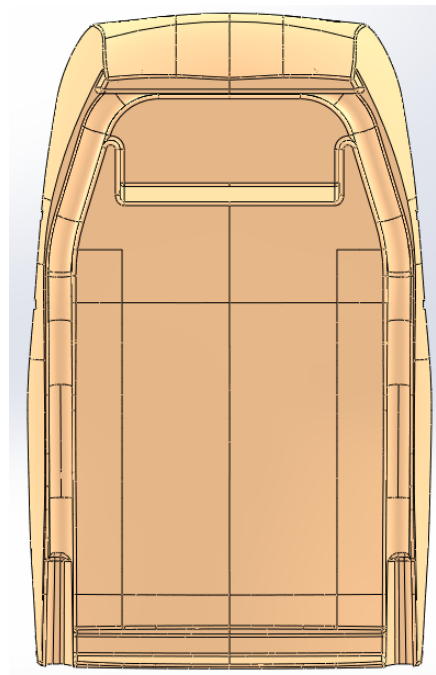


Figura 3.29 / Peça-tipo 5, vista inferior.

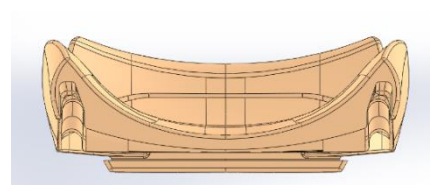


Figura 3.30 / Peça-tipo 5, vista frontal.

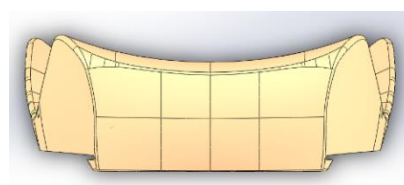


Figura 3.31 / Peça-tipo 5, vista posterior.

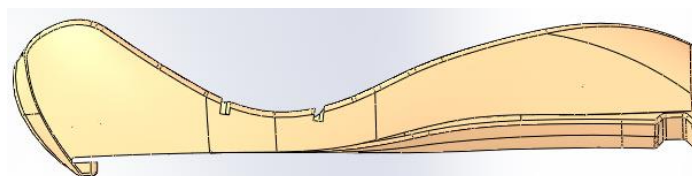


Figura 3.32 / Peça-tipo 5, vista lateral.

Os dados da Tabela 3.11 expõem as dimensões de todas as superfícies a trabalhar. Consta-se que as dimensões superficiais são um pouco elevadas, afetando as dimensões da chapa a utilizar. Para este estudo, assume-se a realização do processo *ISF* sem utilização de ferramentas e sem necessidade de inversão da chapa, para a obtenção de formas em “S”.

Tabela 3.11 | Especificações, peça-tipo 5.

Vista	Dimensões [mm]		Profundidade [mm]	Angulo de Parede [°]	Área superficial [mm²]	Chapa necessária [mm]	
	C	L				C	L
Superior	730,00	450,00	125,00	40,00	323315,96	830,00	550,00
Frontal	420,00	110,00	Não se aplica.		15464,67	430,00	120,00
Posterior	325,00	150,00	16,00	25,00	44178,91	425,00	250,00
Lateral	710,00	135,00	26,00	50,00	64747,72	810,00	235,00
Inferior	670,00	420,00	26,00	16,00	230418,5	770,00	520,00

A limitação mais relevante no decorrer da conformação é a profundidade necessária atingir, e que poderá conduzir à rotura da chapa, Tabela 3.11. Por sua vez, a variação da profundidade influencia o ângulo de parede. No entanto como o ângulo de parede permite a conformação sem rotura, esta limitação é então ultrapassada. Porém, caso esta limitação se torne inconveniente, ela poderá ser vencida aplicando uma trajetória de conformação de estágios múltiplos (capítulo 2.3.2.2 – B). Quanto à espessura final de chapa, Tabela 3.12, obtêm-se espessuras bastante praticáveis, refletidos nos elevados valores do coeficiente de segurança.

Tabela 3.12 | Estudo da variação da espessura da chapa, para peça-tipo 5.

Vista	Amplitudes máximas por face [°]	Espessura de chapa [mm]	Coeficiente Segurança [min = 0,6 mm]
Superior	40,0	1,5	2,5
Frontal	Não se aplica		
Posterior	25,0	1,8	3,0
Lateral	50,0	1,3	2,1
Inferior	16,0	1,9	3,2

Como avançado anteriormente, de modo a facilitar a conceção deste tipo de peças, poderá haver necessidade de se subdividir as mesmas, como proposto na Figura 3.33. A subdivisão parte da necessidade, de reduzir a elevada profundidade atingida e a área de chapa da vista superior, Tabela 3.11. A parte 1 está identificada como cabeceira do encosto lombar, e a parte 3 está identificada como zona lombar e aba lateral, sendo a parte 2 e a parte 4 as suas simetrias.

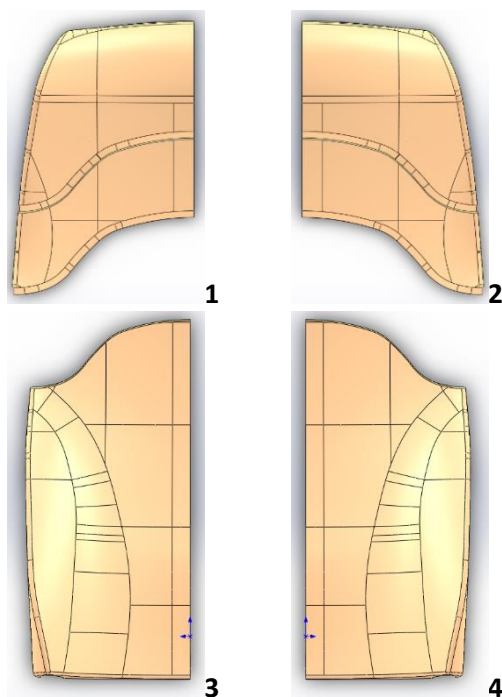


Figura 3.33 / Subdivisão da peça-tipo 5.

A subdivisão da peça-tipo 5 resulta em 4 partes distintas que serão analisadas de acordo com a sua vista superior e lateral, Tabela 3.13 e Tabela 3.14. As vistas inferior, posterior e frontal não necessitam de uma análise tão pormenorizada, pois estas contêm uma geometria bastante simples.

Tabela 3.13 / Especificações, por parte, peça-tipo 5.

Vista	Parte	Dimensões [mm]		Profundidade [mm]	Angulo de Parede [°]	Área superficial [mm²]	Chapa necessária [mm]	
		C	L				C	L
Superior	1 = 2	320,00	220,00	62,00	46,00	55744,78	420,00	320,00
	3 = 4	488,00	220,00	45,00	25,00	105840,13	590,00	320,00
Lateral	1 = 2	340,00	145,00	42,00	7,00	26924,07	440,00	245,00
	3 = 4	392,00	131,00	25,00	55,00	29666,57	492,00	231,00

Tabela 3.14 / Estudo da variação da espessura da chapa, por partes, peça-tipo 5.

Vista	Parte	Amplitudes máximas por face [°]	Espessura de chapa [mm]	Coefficiente Segurança [min = 0,6 mm]
Superior	1 = 2	46,0	1,4	2,3
	3 = 4	25,0	1,8	3,0
Lateral	1 = 2	7,0	1,9	3,3
	3 = 4	55,0	1,5	1,9

A realização desta subdivisão, como previsto, permite reduzir a elevada profundidade atrás estudada, ver Tabela 3.13. Posto isto, este método torna possível a conceção da parte superior e lateral.

3.5.3 Ferramentas / Acessórios e Estruturas

A aplicação do processo *ISF* para a construção de moldes *RIM* envolve alguns obstáculos, os quais poderão ser ultrapassados através da conceção de ferramentas apropriadas.

A Figura 3.34 e a Figura 3.35 demonstram a construção de diferentes ferramentas de apoio à construção da peça-tipo 3. Estas ferramentas têm a particularidade de assegurar o patamar intermédio durante o processo de conformação.

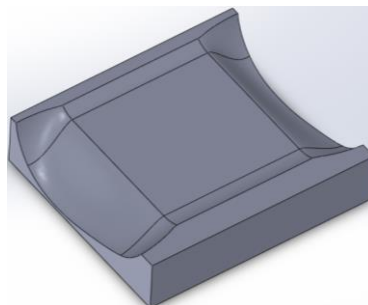
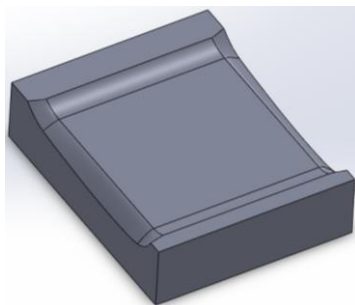


Figura 3.34 | Exemplo, peça-tipo 3, ferramenta tipo 1. Figura 3.35 | Exemplo, peça-tipo 3, ferramenta tipo 2.

Assim sendo, a Figura 3.36 apresenta a ferramenta de apoio à construção do negativo (perspetiva em corte) da peça-tipo 3, o qual formará a cavidade inferior de moldação.

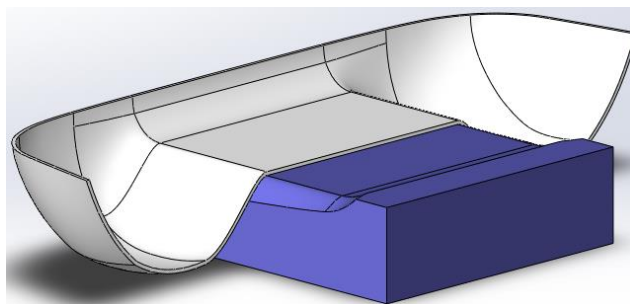


Figura 3.36 | Exemplo, peça-tipo 3, negativo + ferramenta.

Quanto à resistência da carcaça, Figura 3.37, será necessária a criação de uma unidade estrutural de modo a formar um suporte para a peça, Figura 3.38. Este suporte é obtido através de um processo de soldadura em torno de toda a peça. A cavidade inferior da caixa deverá ser deixada em aberto, para que mais tarde seja adicionado o sistema de aquecimento, Figura 3.39, assim como o enchimento da própria estrutura, de forma a criar uma estrutura sólida para toda a cavidade.

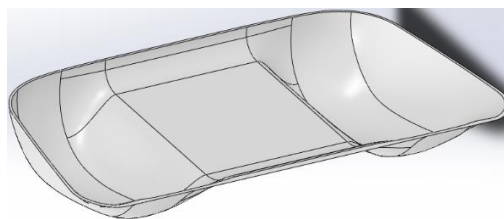


Figura 3.37 | Exemplo, peça-tipo 3, negativo da cavidade inferior.

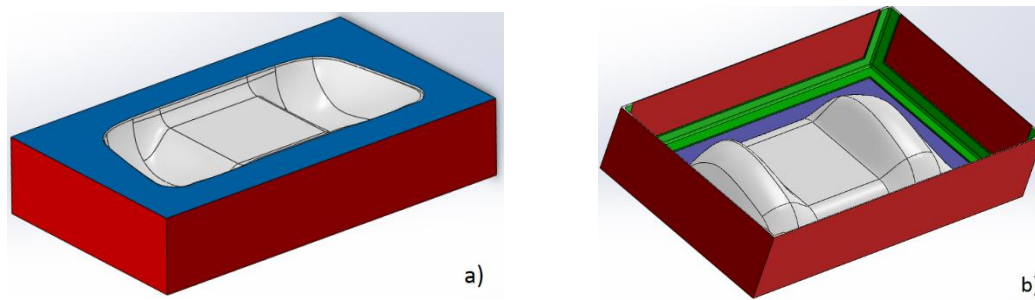


Figura 3.38 / Exemplo, peça-tipo 3 negativo + estrutura de reforço da cavidade inferior (caixa).

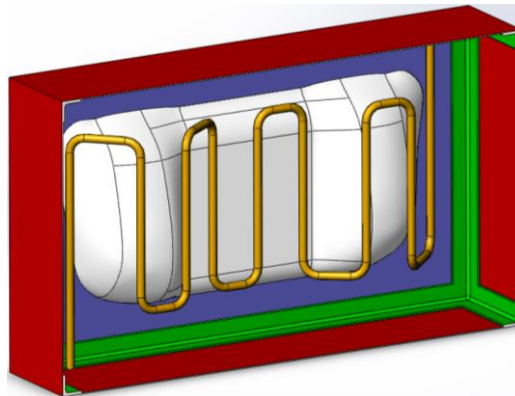


Figura 3.39 / Exemplo, peça-tipo 3, negativo + caixa + refrigeração.

Dada a geometria de determinadas peças, frequentemente há necessidade de implementar insertos nas cavidades moldantes. A Figura 3.40 apresenta dois conjuntos de insertos para a peça-tipo 5.

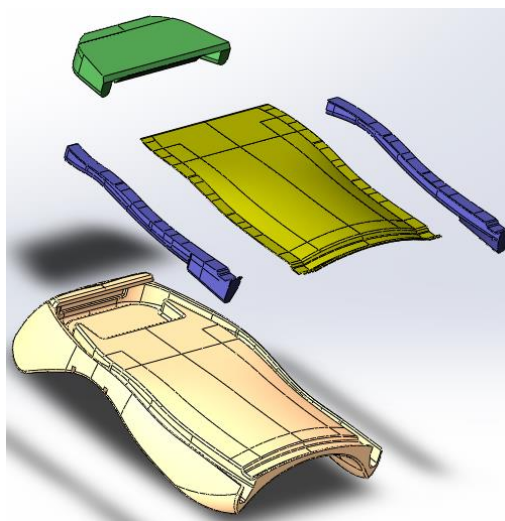


Figura 3.40 / Exemplo, peça-tipo 5, insertos.

O inserto representado a verde, Figura 3.40, corresponde a um inserto amovível, pois, de acordo com a geometria final da espuma, se este inserto estivesse ligado à cavidade superior, no momento de abertura do molde, a espuma iria rasgar no pormenor indicado na Figura 3.41.

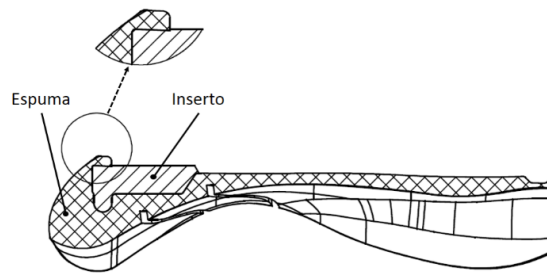


Figura 3.41 | Exemplo, peça-tipo 5, pormenor do inserto.

Os insertos representados a azul, ver Figura 3.40, correspondem a insertos fixos à cavidade moldante. A Figura 3.42 exibe a casca criada por ISF, à qual foram aplicados.

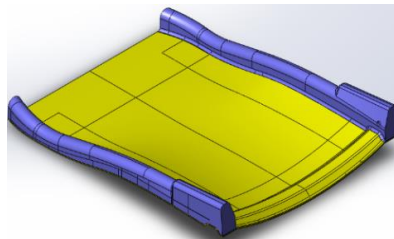


Figura 3.42 | Exemplo, peça-tipo 5, insertos não amovíveis.

Além de todo o conjunto estrutural e aplicação de insertos, há necessidade de implementação de um sistema de jitos. Estes jitos são aplicados sobre a cavidade moldante superior, de forma a permitir a expulsão de ar proveniente do interior da cavidade.

Por fim, seriam colocadas as dobradiças, os cilindros pneumáticos e os fechos, sendo que os dois primeiros componentes cumprem com as funções de elevação da cavidade superior e o terceiro componente cumpre com a função de estanquicidade de todo o molde, pois quando o molde é fechado, os fechos criam pressão entre as duas cavidades moldantes.

3.5.4 Pré e pós-processamento

O pré e pós-processamento envolve técnicas que devem ser asseguradas para o fabrico de todos os componentes do molde. O pós-processamento acarreta um aumento significativo dos custos de produção.

O pós-processamento pode implicar as seguintes tarefas:

- Construção de um modelo – Construir um modelo, de parte da peça para utilização na realização de uma cavidade moldante tanto pelo método *metalcoating*, ou pelo método fibra de vidro;
- Trabalho CAD/CAM/CNC – Conversão dos desenhos da peça solicitada em diferentes tipos de ficheiro;
- Maquinagem – Utilização de qualquer tipo de ferramenta indispensável ao molde;
- Corte a laser – Corte da chapa excessiva após conformação;
- Soldadura – Processo de união necessária à construção da estrutura do molde. A soldadura é responsável por unir os diferentes componentes.

3.6 Análise da viabilidade económica da implementação ISF

A análise da viabilidade económica consiste em analisar e estimar o custo do molde e processos associados, e o seu posicionamento face aos processos atualmente em vigor. Partindo da análise da viabilidade técnica, relativa à seleção de matéria-prima, quantidade de matéria-prima, ferramentas/acessórios, estruturas, operações de pré e pós-processamento (ponto 3.5), foram ainda consideradas a produtividade e o prazo de entrega do molde.

A estimativa de custos associados à construção de um molde RIM foi realizada, de acordo com o método básico de previsão, função de custos, referida no ponto 2.4.2, assumindo valores reais de trabalho obtido a partir de um estudo do mercado para cada operação a ser realizada (Tabela 3.15), assim como para as matérias-primas necessárias (Tabela 3.16). Esta estimativa deve-se à dificuldade encontrada na obtenção de orçamento por parte das empresas fornecedoras da *Sunviauto*.

Tabela 3.15 / Estimativa de custos das operações de pós-processamento.

Pós-processamento	Custo
Operador 1 (Protótipo)	10,00 €/h
Operador 2 (<i>Metalcoating</i>)	15,00 €/h
Operador 3 (Fibra de Vidro)	30,00 €/h
Operador 4 (CAD/CAM)	25,00 €/h
Operador 5 (CNC)	25,00 €/h
Operador 6 (<i>ISF</i>)	60,00 €/h
Operador 7 (Corte Laser)	20,00 €/m
Operador 8 (Soldadura de Al)	50,00 €/m
Utilização da Máquina	20,00 €/h

Tabela 3.16 / Densidade e estimativa de custos das matérias-primas.

Matéria-Prima	Densidade (kg/m ³)	Custo
Madeira (Pinho)	430,00	0,58 €/kg
Poliuretano (Semirrígido)	40,00	3,85 €/l
<i>Gelcoat</i>	1850,00	8,00 €/kg
Pós de Alumínio	2420,00	24,00 €/kg
Resina de Enchimento	1180,00	15,00 €/kg
Resina Epóxi	1200,00	17,50 €/kg
Fibra de Vidro	0,45	4,00 €/kg
Bloco de Alumínio – Al 5083	2660,00	4,40 €/kg
Chapa de Alumínio – Al 1050	2700,00	2,60 €/kg

3.6.1 Estimativa de custos para os processos atuais de concepção de moldes *RIM*

O cálculo dos custos para os processos atuais de concepção de moldes *RIM* partem da análise realizada anteriormente, no ponto 2.4.2. Como avançado a produção de moldes por *metalcoating* e moldes de fibra de vidro obriga à criação de um protótipo da peça a produzir.

A Tabela 3.17 referencia a quantidade de matéria-prima, o tipo de matéria-prima e o tempo de fabrico dedicado à produção do protótipo, que será realizada por um operador 1, com uma intervenção inicial de um operador 4. Por vezes, surgem situações nas quais os protótipos são executados pelo trabalho conjunto de operadores 4 e 5, para gerarem um modelo a ser executado num centro de maquinaria (Tabela 3.15).

Tabela 3.17 / Processos atuais de moldação RIM – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção de protótipos.

	Quantidade		Tempo de Concepção (h)
	Madeira Pinho (kg)	Poliuretano Semirrígido (l)	
Peça-tipo 1	25,60	1,75	40
Peça-tipo 3	4,45	0,30	12
Peça-tipo 5	29,45	1,90	32

A concepção de moldes pelo método *metalcoating* é executada por um operador 2, assim a Tabela 3.18 indica de forma distinta a quantidade de matéria-prima e o tempo de construção necessária à sua construção. As Tabela 3.19 e Tabela 3.20, reúnem o mesmo tipo de dados para a produção de moldes pelo método de fibra de vidro e pelo método de maquinaria em bloco de alumínio.

A realização de um molde pelo método de fibra de vidro é executada por um operador 3, já a concepção do molde de maquinaria em bloco de alumínio, necessita de um trabalho conjunto que implica um estudo *CAD/CAM* → *CNC* (operadores 4 e 5) sendo por fim realizado um processo de maquinaria (utilização da máquina).

Tabela 3.18 / Molde por metalcoating – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção do molde.

	Quantidade (kg)			Tempo de Concepção (h)
	<i>Gelcoat</i>	Pós de Alumínio	Resina de Enchimento	
Peça-tipo 1	2,700	2,100	165,600	80
Peça-tipo 3	0,503	0,628	20,300	28
Peça-tipo 5	1,600	2,100	205,000	88

Tabela 3.19 / Molde fibra de vidro – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção do molde.

	Quantidade (kg)			Tempo de Concepção (h)
	<i>Gelcoat</i>	Resina Epóxi	Fibra de Vidro	
Peça-tipo 1	2,700	8,000	3,000	80
Peça-tipo 3	0,503	2,450	0,920	28
Peça-tipo 5	1,600	7,700	2,900	88

Tabela 3.20 | Molde de alumínio – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção do molde.

	Quantidade (kg)	Tempo de Conceção (h)
	Alumínio	
Peça-tipo 1	291,000	120
Peça-tipo 3	73,300	40
Peça-tipo 5	328,000	120

Os moldes por *metalcoating* e os moldes de fibra de vidro obrigam à construção de uma estrutura de montagem (ponto 3.5.3), com a finalidade de, no caso dos moldes por *metalcoating*, permitir o vazamento da resina de enchimento ou, no caso dos moldes de fibra de vidro, permitir uma maior consistência estrutural do molde. A Tabela 3.21 indica uma estimativa dos custos associados à conceção da estrutura do molde, assim como outros custos que lhe estão relacionados (cilindros pneumáticos, dobradiças, sistema de fecho, insertos, sistema de refrigeração).

Tabela 3.21 | Estimativa de custos adicionais à produção de moldes RIM.

	Processo de moldação	Estrutura de montagem (€)	Outros (€)
Peça-tipo 1	<i>Metalcoating</i>	110	300
	Fibra de Vidro	50	
	Alumínio	-	
Peça-tipo 3	<i>Metalcoating</i>	70	160
	Fibra de Vidro	40	
	Alumínio	-	
Peça-tipo 5	<i>Metalcoating</i>	150	525
	Fibra de Vidro	60	
	Alumínio	-	

Através dos valores especificados nas tabelas anteriores, verifica-se que o tempo de conceção dos diferentes moldes é muito similar, sendo diferenciado pela sua aplicação. O tempo dedicado à conceção dos moldes por *metalcoating* e dos moldes em fibra de vidro, é sobretudo afetado pelas operações de aplicação de diversas camadas de matéria-prima assim como pelo tempo de cura das mesmas. O tempo de conceção dos moldes de alumínio é maioritariamente afetado pelo tempo das operações realizadas por um operador 4, um operador 5 e pelo tempo de utilização da máquina, definido como pelo tempo de maquinaria.

Assim, através de cálculos realizados pelas equações expressas no Anexo A, a Tabela 3.22 apresenta a compilação dos custos detalhados relativamente aos processos atuais de conceção de moldes RIM, indicando custos referentes à matéria-prima, mão-de-obra, maquinaria e outros, com base nos valores individuais das tabelas anteriores.

Tabela 3.22 | Estimativa de custos detalhados dos processos atuais de concepção de moldes RIM.

Peça-tipo 1			Peça-tipo 3			Peça-tipo 5			Matéria-Prima		Mão-de-obra		
Molde por Metalcoating	Molde Fibra de Vidro	Molde Alumínio	Molde por Metalcoating	Molde Fibra de Vidro	Molde Alumínio	Molde por Metalcoating	Molde Fibra de Vidro	Molde Alumínio	Protótipo	Madeira	Com protótipo de Madeira	Com protótipo de Poliuretano	Sem Protótipo
14,9 €	-	-	2,6 €	-	-	17,1 €	-	-	Protótipo	Poliuretano			
27,0 €	-	-	2,3 €	-	-	29,3 €	-	-					
21,4 €	-	-	4,0 €	-	-	12,7 €	-	-					
50,2 €	-	-	15,8 €	-	-	49,9 €	-	-					
2483,9 €	-	-	305,2 €	-	-	3080,0 €	-	-					
-	136,1 €	-	-	42,8 €	-	-	135,5 €	-					
-	11,7 €	-	-	3,7 €	-	-	11,6 €	-					
-	-	1280,0 €	-	-	322,3 €	-	-	1442,6 €					
1600,0 €	2800,0 €	-	540,0 €	960,0 €	-	1640,0 €	2960,0 €	-					
1560,0 €	2760,0 €	-	520,0 €	940,0 €	-	1600,0 €	2920,0 €	-					
-	-	250,0 €	-	-	125,0 €	-	-	250,0 €					
-	-	2200,0 €	-	-	700,0 €	-	-	2200,0 €					
410,0 €	350,0 €	300,0 €	230,0 €	200,0 €	160,0 €	675,0 €	585,0 €	525,0 €					
4552,4 €	3306,1 €	4030,9 €	1077,3 €	1188,8 €	1307,3 €	5446,9 €	3681,3 €	4417,6 €					

Através dos resultados obtidos na Tabela 3.22, podemos constatar:

- Para peças de grandes dimensões:
 - A resina de enchimento contribui para mais de 50 % do custo final do molde, o que coloca atualmente este processo de moldação por *metalcoating* em desuso;
 - Os moldes em fibra de vidro apresentam custos mais reduzidos;
 - Seguindo a tendência do mercado, os moldes em alumínio deveriam ser os mais dispendiosos, dado ao custo da sua matéria-prima e à elevada quantidade de material a ser maquinada;
- A utilização de um protótipo de poliuretanos semirrígido torna o custo final do molde mais reduzido.

3.6.2 Análise da estimativa de custos para o novo processo de produção de moldes *RIM*

Tal como seguido nas alternativas anteriores, os dados para o cálculo da estimativa dos custos do novo processo de moldação *RIM*, através da implementação do *ISF*, foram trabalhados pelo processo de previsão, função de custos.

Como tal, de acordo com análise da viabilidade técnica (ponto 3.5) a metodologia mais apropriada à conceção dos diferentes moldes através do *ISF* consiste na produção modular de um molde (estratégia 1) em combinação com os diferentes processos de moldação *RIM*, como referido no ponto 3.1.

Uma primeira etapa desta implementação, corresponde à necessidade de construção de um modelo, como visto no capítulo 3.5. A peça-tipo que apresenta uma geometria mais complexa à conceção *ISF* é a peça-tipo 1. A Tabela 3.23 reúne dados que indicam uma estimativa da quantidade de matéria-prima necessária à construção de um protótipo, assim como o seu tempo de conceção a ser realizado por um operador 1.

Tabela 3.23 / Novo processo de moldação RIM – Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo de construção de modelos.

	Quantidade		Tempo de Conceção (h)
	Madeira Pinho (kg)	Poliuretano Semirrígido (l)	
Peça-tipo 1	11,1	0,75	28
Peça-tipo 3	-	-	-
Peça-tipo 5	-	-	-

Seguidamente, foi realizado o estudo sobre a estimativa da quantidade de matéria-prima necessária ao fabrico das cavidades moldantes de cada peça-tipo, e o tempo necessário à conceção do molde, Tabela 3.24.

Tabela 3.24 | Estimativa da quantidade de matéria-prima e tempo necessário ao fabrico de cada peça-tipo.

	Quantidade de matéria-prima							Tempo de conceção (h)
	Gelcoat (kg)	Resina de Enchimento (kg)	Poliuretano Semirrígido (l)	Resina Epóxi (kg)	Fibra de Vidro (kg)	Bloco Al 5083 (kg)	Chapa Al 1050 (kg)	
Peça-tipo 1	1,90	110,40	2,40	9,40	1,50	-	13,00	25
Peça-tipo 3	-	20,30	0,29	-	-	8,14	2,70	10
Peça-tipo 5	-	192,41	4,90	-	-	-	17,90	44

Em comum com os outros processos de moldação *RIM*, a implementação deste novo conceito necessita também de uma estrutura de montagem, assim como da especificação dos componentes que vão permitir a união de todos os componentes gerados por *ISF*, e de todos os componentes de aquecimento, insertos e segurança do molde. Uma das principais diferenças entre os processos reside no facto de que, para implementação do processo *ISF*, não existe um apoio, de forma a garantir certas geometrias. Como referido no subcapítulo 3.5.3, para conceção da peça-tipo 1 e da peça-tipo 5, é necessária a criação de uma ferramenta (matriz) com a qual se poderá adquirir a geometria pretendida na cavidade moldante. Os custos associados à construção desta ferramenta estão expressos na Tabela 3.25.

Tabela 3.25 | Estimativa de custos adicionais à produção de moldes *RIM* por *ISF*.

	Estrutura de montagem (€)	Ferramenta (Matriz) (€)	Insertos (€)	Outros (€)
Peça-tipo 1	110	51	-	200
Peça-tipo 3	40	51	-	110
Peça-tipo 5	130	-	176	200

Tendo em conta o cenário de conceção proposto, é de notar que, para a obtenção da peça-tipo 1 e da peça-tipo 3 é conveniente a elaboração da cavidade moldante superior do molde por um outro processo de fabrico. Para tal, foi realizado um estudo das quantidades de matéria-prima, assim como o tempo de conceção da cavidade moldante, Tabela 3.26.

Tabela 3.26 | Estimativa da matéria-prima e tempo de conceção para realização da cavidade moldante superior.

	Matéria-prima	Quantidade (kg)	Custo (€/kg)	Tempo de conceção (h)
Peça-tipo 1	Gelcoat	1,9	8,0	40
	Resina Epóxi	9,4	17,5	
	Fibra de Vidro	1,5	4,0	
Peça-tipo 3	Bloco de Alumínio	8,14	4,40	4
	Chapa Alumínio	2,70	2,6	

Por intermédio de cálculos realizados pelas equações expressas no Anexo A, a Tabela 3.27 apresenta a estimativa dos custos relativamente ao novo conceito de moldes, indicando custos referentes a cada cavidade moldante a ser construída, com base nos

valores individuais das tabelas anteriores. O valor total desta estimativa de custos será apresentado no ponto 3.6.3, Tabela 3.28.

Tabela 3.27 / Estimativa de custos detalhados do novo conceito de moldes.

		Peça-tipo 1		Peça-tipo 3		Peça-tipo 5	
		Cavidade		Cavidade		Cavidade	
Matéria-prima		Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Protótipo	Madeira	6,5 €	-	-	-	-	-
	Poliuretano	5,8 €	-	-	-	-	-
Gelcoat		15,4 €	-	-	-	-	-
Resina Epóxi		163,7 €	-	-	-	-	-
Fibra de Vidro		6,2 €	-	-	-	-	-
Bloco de Alumínio		-	-	35,8 €	-	-	-
Chapa de Alumínio		-	33,8 €	-	7,0 €	15,2 €	31,3 €
Resina de Enchimento		-	1655,9 €	-	305,2 €	962,1 €	1924,1 €
Mão-de-obra	Prot. Madeira	1480,0 €	345,0 €	-	-	-	-
	Prot. Poliuretano	1460,0 €		-	-	-	-
	Sem protótipo	-	-	50,0 €	120,0 €	195,0 €	245,0 €
Máquina		-	900,0 €	40,0 €	360,0 €	600,0 €	1200,0 €
Outros		360,7 €		200,1 €		466,0 €	
Total		4946,5 €		1118,1 €		5638,1 €	

A partir dos resultados obtidos na Tabela 3.27, podemos concluir:

- Dado o processo de construção do molde para cada peça-tipo:
 - A peça-tipo 1 é a única que necessita de um protótipo, devido à complexa geometria da sua cavidade superior;
 - A cavidade superior da peça-tipo 3 é construída através de um bloco de alumínio maquinado;
 - A peça-tipo 5 pode ser unicamente obtida por intermédio do novo conceito de molde.

3.6.3 Comparação da estimativa de custos das alternativas de conceção de moldes *RIM*

Neste subcapítulo é realizada uma comparação da estimativa de custos entre as diferentes alternativas de conceção de moldes *RIM* tendo em conta os investimentos necessários.

Por intermédio de cálculos realizados pelas equações expressas no Anexo A, segue-se a apresentação da estimativa dos custos relativos ao novo conceito de moldação, assim como as massas finais de cada molde, Tabela 3.28.

Tabela 3.28 / Estimativa de custos e de massa final do molde da estratégia ISF e do tipo de protótipo.

	Peça-tipo 1		Peça-tipo 3		Peça-tipo 5	
	Custo	Massa	Custo	Massa	Custo	Massa
Protótipo Madeira	4967,2 €	157 kg	-	42 kg	-	235 kg
Protótipo Poliuretano	4946,5 €		-		-	
Sem protótipo	-		1118,1 €		5638,7 €	

Constata-se que através do enchimento das cavidades moldantes por intermédio de uma resina de enchimento a estrutura do molde torna-se bastante maciça, aumentando assim a sua massa final. A Tabela 3.29 refere os custos e a massa dos processos atuais de moldação *RIM* em comparação com os moldes realizados pelo novo processo de moldação.

Tabela 3.29 / Estimativa de custos e massa final dos moldes associados aos processos atuais de moldação *RIM* em comparação com os moldes realizados pelo novo processo de moldação.

	Processo de conceção de moldes	Custo final do molde %		Massa final do molde
Peça-tipo 1	Metalcoating	4552,4 €	- 8	190,4 kg
	Fibra de Vidro	3306,1 €	- 33	33,4 kg
	Alumínio	4030,9 €	- 19	249,2 kg
Peça-tipo 3	Metalcoating	1077,3 €	- 4	31,5 kg
	Fibra de Vidro	1188,8 €	+ 6	13,4 kg
	Alumínio	1307,3 €	+ 17	75,8 kg
Peça-tipo 5	Metalcoating	5446,9 €	- 3	239,0 kg
	Fibra de Vidro	3681,3 €	- 35	40,6 kg
	Alumínio	4417,6 €	- 28	325,1 kg

Tabela 3.30 / Estimativa de tempo necessário à conceção de moldes *RIM*.

	Processo de conceção de moldes [Tempo de conceção (h)]			
	Metalcoating	Fibra de Vidro	Alumínio	ISF
Peça-tipo 1	120	120	120	93
Peça-tipo 3	40	40	40	14
Peça-tipo 5	120	120	120	44

A partir dos resultados obtidos nas tabelas anteriores, podemos concluir:

- Quando obtido através do método *ISF* (Tabela 3.29), o mesmo molde deverá resultar:
 - Mais dispendioso na maioria dos casos estudados;
 - Mais pesado, dificultando o seu manuseamento;
- Contudo a estratégia utilizada demonstra tempos de conceção mais reduzidos o que poderá constituir uma vantagem sobre os processos atuais.

4 CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

Neste trabalho foi abordado o potencial de implementação do processo de estampagem incremental de chapa fina, para a concepção de moldes para injeção de espumas (*RIM*), a partir do estudo da viabilidade técnico-económica.

Dadas as dificuldades sentidas na obtenção orçamental dos processos de moldação atuais *RIM* para cada peça-tipo através das empresas fornecedoras, revelou-se necessário realizar uma estimativa de custos associados a cada matéria-prima e operação de pré e pós-processamento, assim como o tempo necessário à realização de cada etapa.

É de notar que as limitações impostas pela implementação do processo *ISF* são ultrapassadas quando se realiza uma divisão do molde, obtendo-o por partes, sendo assim, esta divisão foi propícia à obtenção de duas estratégias.

Toda a análise de viabilidade económica foi baseada numa estratégia de concepção modular do molde (estratégia 1), em combinação com os diferentes processos de moldação *RIM* já existentes.

De entre as duas estratégias propostas, esperava-se que a estratégia 2 tivesse um resultado mais dispendioso na realização de um molde, uma vez que se baseava na produção de diversas partes o que resultava no aumento do custo final do produto, assim como no aumento do tempo de produção. De outro modo a implementação desta estratégia terá melhor aplicabilidade para modificar produtos com tempo de vida mais longo através de pequenas alterações ao longo do tempo.

Em suma, comparativamente aos processos atuais de construção de moldes *RIM*, foi realizada uma estimativa sobre o processo de concepção *ISF*, tendo-se verificado que, em termos de desempenho económico, a execução destes moldes-carcaça por *ISF* se encontra ao nível dos processos alternativos em vigor. No entanto, a aplicação do *ISF* para a obtenção deste tipo de moldes destaca-se pelo menor número e complexidade das operações envolvidas, resultando numa redução significativa do tempo total de fabrico, i.e., na mais rápida disponibilidade do molde para entrega e apresentação de um novo produto ao mercado, o que se pode traduzir numa clara vantagem para o cliente.

4.2 Trabalhos futuros

À posteriori dos trabalhos terminados sobre a viabilidade técnico-económica, percebe-se a necessidade de estudar novas estratégias para redução de custos através do ISF:

- Método de enchimento:
 - Realização de ensaios de injeção de espumas:
 - » Estudar a integridade do molde;
 - » Material por ele constituído;
 - » Gradiente de temperatura no seu interior.
- Construção de protótipos modulares.

Por outro lado, como a conceção do molde se pode tornar um pouco dispendiosa, em alternativa à realização de um protótipo, primeiramente seria realizar todo o processo através de um programa de simulação.

REFERÊNCIAS

1. Kopac, J. and Z. Kampus, *Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **162–163**(0): p. 622-628.
2. Echrif, S.B.M. and M. Hrairi, *Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes*. Materials and Manufacturing Processes, 2011. **26**(11): p. 1404-1414.
3. Schaeffer, L., *Conformação de Chapas Metálicas*. 2004, Porto Alegre: Imprensa Livre.
4. Jackson, K. and J. Allwood, *The mechanics of incremental sheet forming*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. **209**(3): p. 1158-1174.
5. Vilar, W., *Química e Tecnologia dos Poliuretanos*. 3 ed. Vol. 1. 1998: Vilar Consultoria.
6. Vieira, M., *Manual Sunviauto de ensaios de espumas de poliuretano*. 2006, Sunviauto. p. 22.
7. Walsh, R.A., *McGraw-Hill machining and metalworking handbook*. 1994, New York: McGraw-Hill. XVII, [1], 1516 p.-XVII, [1], 1516 p.
8. Leszak, E., *Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming*. 1964. p. 3.
9. Jeswiet, J., et al., *Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005. **54**(2): p. 88-114.
10. Schafer, T. and R.D. Schraft, *Incremental sheet metal forming by industrial robots*. Rapid Prototyping Journal, 2005. **11**(5): p. 278 - 286.
11. Emmens, W.C., G. Sebastiani, and A.H. van den Boogaard, *The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history*. Journal of Materials Processing Technology, 2010. **210**(8): p. 981-997.
12. Martins, P.A.F., et al., *Theory of single point incremental forming*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008. **57**(1): p. 247-252.
13. Araghi, B.T., et al., *Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009. **58**(1): p. 225-228.

14. Taleb Araghi, B., et al., *Review on the development of a hybrid incremental sheet forming system for small batch sizes and individualized production*. Production Engineering, 2011. **5**(4): p. 393-404.
15. Bambach, M., G. Hirt, and J. Ames, *Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process*. AIP Conference Proceedings, 2004. **712**(1): p. 1969-1974.
16. Malhotra, R., et al., *A new methodology for multi-pass single point incremental forming with mixed toolpaths*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011. **60**(1): p. 323-326.
17. Castelan, J., *Estampagem incremental do titânio comercialmente puro à aplicação em implante craniano*. 2010, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
18. Tiburi, F., *Aspectos do processo de estampagem incremental*, in *Estampagem; Processos de fabricação*. 2007, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais.
19. Attanasio, A., E. Ceretti, and C. Giardini, *Optimization of tool path in two points incremental forming*. Journal of Materials Processing Technology, 2006. **177**(1-3): p. 409-412.
20. Ambrogio, G., et al., *Process Mechanics Analysis in Single Point Incremental Forming*. AIP Conference Proceedings, 2004. **712**(1): p. 922-927.
21. Ham, M. and J. Jeswiet, *Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2006. **55**(1): p. 241-244.
22. Attanasio, A., et al., *Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **197**(1-3): p. 59-67.
23. Hussain, G., L. Gao, and Z.Y. Zhang, *Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. **37**(9-10): p. 920-926.
24. Gandarias, D.E. *Micro Manufacturing*. 2013; Available from: http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/microconformado/4-conformado-incremental/4-4-aplicaciones/4-4-aplicaciones/view?set_language=en.
25. Daleffe, A., *Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro*. 2008, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais.

26. Araújo, R.d.S., *Processo de Estampagem Incremental em Ligas de Titânio: Aplicação em Próteses Crâniofaciais*. 2012, Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. p. 129.
27. Tisza, M., *General overview of sheet incremental forming*. Manufacturing Engineering, 2012. **55**(1): p. 113-120.
28. Daleffe, A., *Estudo do processo de ISF de alumínio puro*, in *Alumínio; Estampagem; Processos de fabricação; [en] CNC device; [en] Incremental die; [en] Incremental sheet forming tool* 2008, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais.

29. Lievers, W.B., A.K. Pilkey, and D.J. Lloyd, *Using incremental forming to calibrate a void nucleation model for automotive aluminum sheet alloys*. Acta Materialia, 2004. **52**(10): p. 3001-3007.
30. Kim, S.W., et al., *Incremental forming of Mg alloy sheet at elevated temperatures*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007. **21**(10): p. 1518-1522.
31. Ji, Y.H. and J.J. Park, *Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **201**(1-3): p. 354-358.
32. Murata, A., *A new trial on incremental forming of sheet metal parts*. R&D Review of Toyota CRDL, 1999: p. 34.
33. Fan, G., et al., *Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010. **49**(9-12): p. 941-947.
34. Duflou, J.R., et al., *Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2007. **56**(1): p. 273-276.
35. Geiger, M., B. Müller, and T. Hennige, *Laser Forming of Metals*. Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition), ed. K.H.J.B. Editors-in-Chief: , et al. 2001, Oxford: Elsevier. 4408-4410.
36. Male, A.T., et al., *Flexible forming of sheet metal using plasma arc*. Journal of Materials Processing Technology, 2001. **115**(1): p. 61-64.
37. Jurisevic, B., K. Kuzman, and M. Junkar, *Water jetting technology: an alternative in incremental sheet metal forming*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006. **31**(1-2): p. 18-23.
38. Vallabhan, C.V.G. and M.Z. Asik, *Finite element method for engineers from theory to practice*. 2011, Oxford: Alpha Science International Ltd.
39. Ambrogio, G., et al., *Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **162-163**(0): p. 156-162.
40. Meireles, M., *Ferramentas Administrativas para identificar, observar e analisar problemas*. Vol. 2. 2001, Arte Ciência: Villipress. 144.
41. Almeida, L. and T. Freire, *Metodologia da investigação em psicologia e educação*. 2 ed. 2000, Braga: Psiquilíbrios.
42. Morais, P.C., *Descrição, análise e interpretação de informação quantitativa*. 2005, Instituto Politécnico de Bragança Escola Superior de Educação: Bragança. p. 31.
43. Herrero, F. and Cuesta, *Escalas de medida y estadística*. 2013.
44. Menges, G., W. Michaeli, and P. Mohren, *How to make injection molds*. Vol. 3rd ed. 2001, Munich: Hanser Publishers. XVII, [3], 612 p.-XVII, [3], 612 p.
45. American Society for, M., *Properties and selection nonferrous alloys and special-purpose materials*. Metals handbook. Vol. 10th ed. 1992, Materials Park, OH: ASM. 1328 p.-1328 p.
46. Campbell, F.C., *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. 2008: ASM International.
47. InfoMet. *Alumínio Comercialmente Puro*. 2013; Available from: http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=11&cod_assunto=49.
48. SprintMetal, *Caraterísticas das ligas de alumínio*. 2013.

49. Aluminium, U., *Mechanical Properties: Sheet and Plate*. 2013.
50. Li, J.-c., C. Li, and T.-g. Zhou, *Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012. **22, Supplement 1**(0): p. s54-s60.

APÊNDICE

Anexo A

Custo Final da Matéria-Prima (C_{FMP})

$$C_{FMP} = \sum \left[Quantidade_{(kg)} \times C_{Matéria-Prima_{(€/kg)}} \right] \quad (3)$$

Custo de Conceção (C_C)

$$C_C = \sum \left[Tempo\ de\ Conceção_{(€)} \times C_{Operário_{(€/h)}} \right] \quad (4)$$

Custo Protótipo ($C_{Prot.}$)

$$C_{Prot.} = C_{FMP} + C_C \quad (5)$$

Custo Molde *Metalcoating* ($C_{M_{Con.}}$)

$$C_{M_{Con.}} = C_{Prot.} + C_{FMP} + C_C + C_{EM} + C_{Outros} \quad (6)$$

Custo Molde Fibra de Vidro ($C_{M_{FV}}$)

$$C_{M_{FV}} = C_{Prot.} + C_{FMP} + C_C + C_{EM} + C_{Outros} \quad (7)$$

Custo Molde Alumínio ($C_{M_{Al}}$)

$$C_{M_{Al}} = C_{FMP} + C_C + C_{Outros} \quad (8)$$

Custo Molde ISF ($C_{M_{ISF}}$)

$$C_{M_{ISF}} = C_{Prot.} + C_{FMP} + C_C + C_{EM} + C_{Outros} \quad (9)$$

C_{EM} – Custo da estrutura de montagem
 C_{Outros} – Outros custos